

БИБЛИОТЕЧКА ·КВАНТ·

ВЫПУСК 42

Л. В. ТАРАСОВ

ЛАЗЕРЫ: ДЕЙСТВИТЕЛЬНОСТЬ И НАДЕЖДЫ





БИБЛИОТЕЧКА «КВАНТ»
ВЫПУСК 42

Л. В. ТАРАСОВ

ЛАЗЕРЫ: ДЕЙСТВИТЕЛЬНОСТЬ И НАДЕЖДЫ



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1985

22.34
Т 19
УДК 535

Ответственный редактор выпуска Л. Г. Асламазов

Тарасов Л. В.

Т19 Лазеры: действительность и надежды.— М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985.— 176 с.— (Библиотечка «Квант». Вып. 42.)— 30 к.

Популярно рассказано о роли лазеров в современном мире, о достигнутых успехах лазерной техники и надеждах, которые связывают с ее развитием. Рассмотрены различные применения лазеров; для обработки материалов, в медицине, локации, измерительной технике, системах связи, для обработки и хранения информации, в системах контроля, для разделения изотопов, решения проблемы управляемого термоядерного синтеза. Кроме того, изложены основы физики работы лазеров и управления лазерным излучением, новые направления современной оптики (голография, нелинейная оптика, волоконная оптика, адаптивная оптика); приведены исторические сведения и даны многочисленные примеры отечественных лазеров и лазерных установок.
Для школьников, преподавателей, студентов, лекторов.

Т $\frac{1704050000-095}{053(02)-85}$ 192-85

ББК 22.34
535

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Световой луч! С давних времен человек в своих мечтах видел в нем надежного и могучего помощника, свободно проникающего в темницы, способного разрушить любые преграды и защитить от любого врага. К всемогущему световому лучу обращались и многие писатели-фантасты. Всемирно известны романы «Война миров» Герберта Уэллса и «Гиперболоид инженера Гарина» Алексея Толстого. Правда, в этих романах тепловой или световой луч оказывался в руках сил зла, которые использовали лучи для разрушения, для приобретения власти над человечеством. Люди же мечтали о луче-труженике, луче-помощнике, луче-созидателе. Этой мечте суждено было сбыться в наше удивительное время. Реальностью стали не чудовищный марсианский генератор тепловых лучей или гиперболоид одержимого идеей мирового господства человека — ненавистника, а лазеры, которые сегодня успешно «трудятся» в клиниках, на заводах, строительных площадках, в научно-исследовательских лабораториях.

Изобретение лазера стоит в одном ряду с наиболее выдающимися достижениями науки и техники XX века. Первый лазер появился в 1960 г., и сразу же началось бурное развитие лазерной техники. В короткое время были созданы разнообразные типы лазеров и лазерных устройств, предназначенных для решения конкретных научных и технических задач. Лазерной технике всего четверть века, однако лазеры уже успели завоевать прочные позиции во многих отраслях народного хозяйства.

Как заметил академик А. П. Александров, «всякий мальчишка теперь знает слово л а з е р». И все же, что такое лазер, чем он интересен и полезен? Один из основоположников науки о лазерах — квантовой электроники — академик Н. Г. Басов отвечает на этот вопрос так: «Лазер — это устройство, в котором энергия, например тепловая, химическая, электрическая, преобразуется в энергию электромагнитного поля — лазерный луч. При таком преобразо-

вании часть энергии неизбежно теряется, но важно то, что полученная в результате лазерная энергия обладает несравненно более высоким качеством. Качество лазерной энергии определяется ее высокой концентрацией и возможностью передачи на значительное расстояние. Лазерный луч можно сфокусировать в крохотное пятнышко диаметра порядка длины световой волны и получить плотность энергии, превышающую уже на сегодняшний день плотность энергии ядерного взрыва... С помощью лазерного излучения уже удалось достичь самых высоких значений температуры, давления, напряженности магнитного поля. Наконец, лазерный луч является самым емким носителем информации и в этой роли — принципиально новым средством ее передачи и обработки».

Лазеры оказались гораздо более интересными устройствами, чем порожденные воображением писателей-фантастов «гиперболоид» или «генератор теплового луча», предназначавшиеся, по сути дела, только для разрушения. Действительность оказалась значительно ярче и богаче фантазии. В наши дни лазеры успешно трудятся на современном производстве, справляясь с самыми разнообразными задачами. Лазерным лучом раскраивают ткани и режут стальные листы, сваривают кузовы автомобилей и приваривают мельчайшие детали в радиоэлектронной аппаратуре, пробивают отверстия в хрупких и сверхтвердых материалах. В руках хирурга лазерный луч превратился в скальпель, обладающий рядом удивительных свойств. Лазеры широко используются в современных контрольно-измерительных устройствах, вычислительных комплексах, системах локации и связи. Лазеры позволяют быстро и надежно контролировать загрязненность атмосферы и поверхности моря, выявлять наиболее нагруженные участки деталей различных механизмов, определять внутренние дефекты в них. Лазерный луч становится надежным помощником строителей, картографов, археологов, криминалистов. Непрерывно расширяется область применения лазеров в научных исследованиях — физических, химических, биологических.

Надо особо отметить, что освоение лазерных методов или, иначе говоря, лазерных технологий значительно повышает эффективность современного производства. Лазерные технологии позволяют осуществлять наиболее полную автоматизацию производственных процессов. Одновременно при этом экономится сырье и рабочее время, повышается качество продукции. Например, практически мгновенная пробивка отверстий лазерным излучением во много раз

увеличивает производительность работы сверловщика и к тому же существенно повышает качество этой работы. Лазерное изготовление микросхем отличается высокой производительностью и высоким качеством. В обоих примерах производственные операции легко поддаются автоматизации; управление лазерным лучом может взять на себя специальное вычислительное устройство. Можно уверенно утверждать, что внедрение и совершенствование лазерных технологий приведет к качественному изменению всего облика современного производства.

Огромны и впечатляющи достижения лазерной техники сегодняшнего дня. Завтрашний день обещает еще более грандиозные свершения. С лазерами связывают многие надежды: от создания объемного кино до решения таких глобальных проблем, как установление сверхдальней наземной и подводной оптической связи, разгадку тайн фотосинтеза, осуществление управляемой термоядерной реакции.

Данная книга — это попытка популярно рассказать о роли лазеров в современном мире. Мы расскажем как об уже достигнутых успехах лазерной техники, так и о перспективах, о тех надеждах, которые связываются с ее развитием. Тем более, что действительность и надежды переплетаются здесь удивительным образом.

Автор выражает глубокую признательность Л. Г. Асламазову за замечания и пожелания, способствовавшие улучшению книги, В. Г. Дмитриеву, И. Н. Компанцу, Д. Л. Тарасову за обсуждение отдельных разделов книги, А. Н. Тарасовой и Т. Л. Новиковой за помощь в работе над рукописью.

Автор

ЧТО ТАКОЕ ЛАЗЕР И ЧЕМ ЗАМЕЧАТЕЛЬНО ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Как свет взаимодействует с атомами и молекулами? Альберт Эйнштейн известен как один из создателей теории относительности. Но, возможно, не все знают, что его перу принадлежат также работы, которые сегодня специалисты по квантовой электронике называют основополагающими. Мы имеем в виду две работы Эйнштейна, опубликованные в 1916 г. Первая называется «Испускание и поглощение излучения по квантовой теории», а вторая — «К квантовой теории излучения».

Мог ли кто-нибудь предположить тогда, что изложенные в этих работах физические идеи лягут впоследствии в основу квантовой электроники и приведут, в конечном счете, к созданию лазера?

Эйнштейн показал, что существуют два различных процесса испускания энергии молекулами вещества. Наряду с «обычным» процессом испускания, известным как спонтанное (самопроизвольное) испускание, должен наблюдаться, как полагал Эйнштейн, процесс испускания, происходящий не самопроизвольно, а под воздействием излучения окружающей молекулы среды. Эйнштейн назвал этот процесс индуцированным (вынужденным) излучением.

Прошли десятилетия, прежде чем ученые убедились, что «придуманное» Эйнштейном вынужденное излучение не только действительно существует, но, более того, при определенных условиях может играть важную роль. Именно этот процесс и лежит в основе работы лазера. Само слово «лазер» составлено из начальных букв английского словосочетания Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, что в переводе на русский язык означает «усиление света вынужденным излучением».

Естественно начать разговор о лазере с обсуждения тех фундаментальных физических идей, которые впервые были изложены в упомянутых работах Эйнштейна. Иначе говоря, мы начнем с обсуждения вопросов о том, как свет взаимодействует с атомами и молекулами вещества и в чем проявляются особенности вынужденного испускания света.

Прежде всего напомним читателю, что энергия атома, как и энергия молекулы, *квантуется* — иными словами, энергия не изменяется непрерывно, а принимает лишь некоторые определенные значения. Этим значениям энергии соответствуют так называемые *энергетические уровни*. Так и говорят: атом (молекула) находится на таком-то энергетическом уровне. Переход атома или молекулы с одного энергетического уровня на другой совершается скачком; при этом поглощается или, напротив, испускается соответствующая порция излучения — квант света, или, иначе, *фотон*. При переходе атома на более высокий энергетический уровень фотон поглощается; при переходе же атома на более низкий уровень происходит испускание фотона. Энергия поглощаемого или испускаемого фотона равна разности энергий уровней атома, между которыми совершается переход. Напомним, что энергия фотона есть $h\nu$, где ν — частота излучения, h — постоянная Планка ($h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с).

Рассмотрим простую физическую модель, в которой вещество состоит из атомов, имеющих только два энергетических уровня. Обозначим энергию этих уровней через E_1 и E_2, причем пусть E_1 меньше, чем E_2. Будем облучать вещество фотонами с энергией, равной $E_2 - E_1$. Частота такого света равна $(E_2 - E_1)/h$.

Предположим, что атом находится на нижнем энергетическом уровне (уровне E_1). Он может поглотить фотон с энергией $E_2 - E_1$ и совершить скачок с уровня E_1 на уровень E_2 (рис. 1, *а*). Это есть единичный акт *поглощения света* веществом.

Что станет с атомом, который оказался на верхнем уровне E_2? Ясно, что этот атом не может поглотить фотона. Зато он может под воздействием фотона перейти обратно на уровень E_1. При этом появится еще один фотон, имеющий энергию $E_2 - E_1$ (рис. 1, *б*). Это и есть процесс *вынужденного испускания света*. Его «вынуждает» или, лучше сказать, инициирует фотон, играющий в данном случае роль своеобразного «спускового механизма», который «сталкивает» атом с верхнего энергетического уровня на нижний. Существенно, что появляющийся новый фотон (назовем его вторичным) будет точной копией первичного фотона, инициировавшего переход атома с уровня E_2 на уровень E_1. Оба фотона имеют не только одну и ту же энергию, но и одно и то же направление движения.

Можно представить себе картину, когда первичный фотон инициирует переход с уровня E_2 на уровень E_1 сразу

во многих атомах. В результате появится не один вторичный фотон, а целая лавина таких фотонов. Все они будут иметь одинаковую энергию; все они будут двигаться в одном направлении — в направлении движения первичного фотона.

Конечно, оказавшийся на уровне E_2 атом может возвратиться на уровень E_1 самопроизвольно (*спонтанное испускание света*; см. рис. 1, *в*). Рождающийся при этом фотон

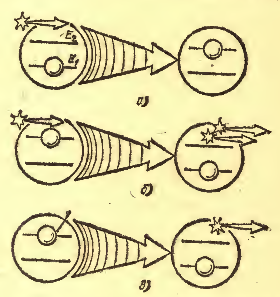


Рис. 1. *а*) Поглощение света. *б*) Вынужденное испускание света. *в*) Спонтанное испускание света.

имеет энергию, равную $E_2—E_1$; направление же его движения произвольно.

Таким образом, имеются два типа процессов испускания света атомами и молекулами: вынужденное испускание и спонтанное испускание. Первый процесс управляемый — его инициирует первичный фотон, который не только вызывает переход атома с уровня E_2 на уровень E_1, но и определяет направление движения родившегося при этом переходе фотона. Второй процесс имеет ярко выраженный случайный характер; случаен момент перехода, случайно направление движения родившегося фотона. Если при вынужденном испускании возникает лавина фотонов, дружно летящих в одном направлении, то при спонтанном испускании

фотоны разлетаются кто куда, к тому же моменты их рождения случайны, не согласованы друг с другом.

Может ли вещество усиливать проходящее сквозь него излучение? Все хорошо знают, что вещество ослабляет излучение. А возможна ли ситуация, когда вещество не ослабляет, а усиливает проходящее сквозь него излучение? Над этим вопросом задумался в 1939 г. советский физик В. А. Фабрикант.

Действительно, предположим, что сквозь множество атомов, часть которых находится на уровне E_1, а часть на уровне E_2, распространяется световой пучок, состоящий из фотонов с энергией E_2—E_1. Атомы, находящиеся на уровне E_1, будут поглощать эти фотоны и переходить на уровень E_2, в результате световой пучок будет ослабляться. Атомы же, находящиеся на уровне E_2, будут под воздействием фотонов переходить на уровень E_1; при этом появятся вторичные фотоны и, значит, световой пучок будет усиливаться. Какой же процесс окажется преобладающим — ослабление светового пучка за счет поглощения фотонов атомами или усиление пучка за счет вынужденного испускания фотонов? Известно, что вероятность поглощения фотона атомом, находящимся на уровне E_1, равна вероятности того, что этот фотон вызовет вынужденное испускание в атоме, находящемся на уровне E_2. Это было показано уже в работах Эйнштейна. Значит, рассуждал В. А. Фабрикант, все дело в том, каких атомов больше — тех, которые находятся на уровне E_1, или же тех, которые находятся на уровне E_2. Если атомов больше на уровне E_1, то чаще будут происходить акты поглощения фотонов атомами — световой пучок будет ослабляться. Если же большинство атомов окажется на уровне E_2, то чаще будут происходить акты вынужденного испускания фотонов; в этом случае вынужденное испускание света должно преобладать над поглощением света и в результате световой пучок усилится. Обычно, чем выше уровень энергии, тем меньше на нем атомов (молекул). Поэтому-то обычно световой пучок ослабляется, проходя сквозь вещество. Следовательно, для усиления пучка надо создать необычную ситуацию — когда число атомов или молекул на более высоком уровне энергии больше, чем на нижнем. Как теперь говорят, надо создать *инверсную*, иными словами, *обращенную*, населенность энергетических уровней в веществе.

Итак, возможность усиления света в веществе была найдена! Надо пропускать световой пучок через среду с инверсной населенностью энергетических уровней. Для приготов-

ления такой среды можно воспользоваться, например, вспомогательным излучением, которое предварительно перебросит значительную часть атомов с нижних энергетических уровней на верхние. Возможны и иные пути возбуждения атомов, скажем, электрический разряд в газе.

Казалось, оставалось сделать совсем немного — и вот он: усилитель излучения. Но началась Великая Отечественная война. Научные исследования, не имевшие непосредственного отношения к обороне страны, пришлось отложить до победы над врагом. После войны В. А. Фабрикант вместе со своими сотрудниками М. М. Вудынским и Ф. А. Бутаевой вернулись к исследованиям, прерванным войной. Эти исследования проводились в Московском энергетическом институте. И вот в 1951 г. В. А. Фабрикант с сотрудниками подают заявку на изобретение способа усиления излучения при помощи вынужденного испускания. На эту заявку было выдано свидетельство, где под рубрикой «предмет изобретения» записано: «Способ усиления электромагнитных излучений (ультрафиолетового, видимого, инфракрасного и радиодиапазонов волн), отличающийся тем, что усиливаемое излучение пропускают через среду, в которой с помощью вспомогательного излучения или другим путем создают избыточную по сравнению с равновесной концентрацию атомов, других частиц или их систем на верхних энергетических уровнях, соответствующих возбужденным состояниям».

Таковы были первые шаги на пути создания квантового усилителя света, а затем и генератора света — лазера. Последующие шаги связаны, прежде всего, с именами выдающихся советских физиков — академиков А. М. Прохорова и Н. Г. Басова. Большой вклад в развитие квантовой электроники внесли также американские физики Ч. Таунс, А. Шавлов, Т. Мейман, советские физики Ю. М. Попов, О. Н. Крохин, Б. М. Вул и другие. Более подробно об этом написано в исторической справке, которую читатель найдет в конце нашего первого рассказа. Пока же мы отвлечемся от истории создания усилителей и генераторов света с тем, чтобы поближе познакомиться с физикой процессов, происходящих в лазере.

Что происходит в активном элементе лазера? «Сердце» лазера — это его *активный элемент*. Отдаленно он похож на кекс с изюмом. «Изюминками» являются атомы или молекулы, обладающие очень важным в данном случае свойством. Оказавшись на одном из своих верхних энергетических уровней, они могут относительно долго оставаться на

нем, не торопясь самопроизвольно (спонтанно) возвратиться на нижние уровни. Поэтому можно «накопить» достаточно много атомов (молекул) на таком уровне — так, что их станет значительно больше, чем на нижних уровнях. В результате будет создана инверсная населенность уровней, что, как мы уже знаем, необходимо для преобладания процессов вынужденного испускания света над процессами поглощения света. Уровень, на котором можно накопить избыток атомов или молекул, называют долгоживущим, а сами атомы и молекулы («изюминки» активного элемента) — *активными центрами*.

Для примера рассмотрим конкретный активный элемент — *гранат с неодимом*. Гранат (точнее говоря, иттриево-алюминиевый гранат) представляет собой прозрачный

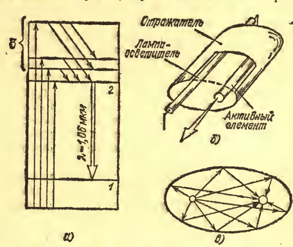


Рис. 2. *а*) Схема уровней иона неодима и квантовые переходы. *б*) Лазер на гранате с неодимом. *в*) Фокусировка световых лучей на активный элемент при помощи отражателя.

кристалл; «изюминками», или, иными словами, активными центрами, являются ионы неодима, которые вводятся в кристалл граната в процессе изготовления активного элемента. На рис. 2, *а* показана в упрощенном виде система энергетических уровней иона неодима в гранате. Поглощая излучение специальной лампы-осветителя, ионы неодима возбуждаются: переходят на верхние уровни, обозначенные на рисунке цифрой *3*. Затем очень скоро они «сваливаются» с этих уровней и накапливаются на уровне *2*, расходуя избыток энергии на нагревание кристалла граната. Уровень *2* и есть

тот самый долгоживущий уровень, о котором мы уже говорили. Активный элемент будет готов к работе тогда, когда на уровне *2* накопится значительно больше ионов неодима, чем их имеется на уровне *1*. Теперь достаточно «сигнала», роль которого сыграет фотон с энергией, равной разности энергий уровней *2* и *1*, чтобы произошел дружный переход ионов неодима с уровня *2* на уровень *1*. В результате этого перехода возникнет лавина фотонов, которая и будет представлять собой лазерное излучение.

На рис. 2, *б* схематически показано, как на практике осуществляют возбуждение активных центров в лазере на гранате с неодимом. И активный элемент, и лампа-осветитель имеют цилиндрическую форму. Их помещают внутрь отражателя таким образом, чтобы практически вся световая энергия, испускаемая лампой-осветителем, концентрировалась на активном элементе (рис. 2, *в*).

Когда говорят о возбуждении активных центров, применяют выразительный термин «накачка» — имеют в виду, что активные центры как бы накачиваются энергией, накапливаясь на долгоживущем уровне. В нашем примере используется *оптическая накачка* — накачка светом специальной газоразрядной лампы. Возможна накачка при помощи мощных световых импульсов, генерируемых лампой-вспышкой (*импульсная* накачка). При этом в ответ на каждый импульс накачки возникает импульс лазерного излучения. Возможно также непрерывное облучение активного элемента лампой-осветителем (*непрерывная* накачка). В этом случае лазерное излучение может возникать как в виде непрерывного светового луча, так и в виде регулярной последовательности световых импульсов. Впрочем, не будем забегать вперед; обо всем этом мы поговорим во втором рассказе.

Итак, накачка обеспечивает инверсную заселенность энергетических уровней активных центров. Мы уже знаем, что если теперь направить через активный элемент световой пучок соответствующей частоты, то он будет не ослабляться, а усиливаться (поскольку вынужденное испускание будет преобладать над поглощением света). Все так и происходит в приборах, называемых квантовыми усилителями света. Лазер же является не усилителем, а *генератором* света; здесь нет первичного светового пучка. Поэтому важно понять, как же начинается или, точнее говоря, *зарождается* генерация лазерного излучения.

Здесь надо вспомнить о спонтанном испускании света. С него-то все и начинается. Роль первичных фотонов, ини-

циирующих вынужденное испускание новых (вторичных) фотонов и тем самым дающих начало процессу лазерной генерации, играют фотоны, которые родились в результате спонтанных переходов активных центров с уровня *2* на уровень *1* (мы используем систему уровней на рис. 2, *а*). Каждый спонтанно родившийся фотон может затем инициировать появление целой лавины вторичных фотонов, летящих в том же направлении, что и первичный фотон.

Но позвольте, может заметить внимательный читатель, ведь спонтанно рождающиеся фотоны испускаются активными центрами несогласованно во времени и притом в самых разных направлениях. Значит, в разных направлениях «побегут» и соответствующие лавины вторичных фотонов. Каким же образом возникает лазерный луч?

Недоумение читателя совершенно понятно. Чтобы получить лазерный луч, необходимо как-то *упорядочить* описанную выше картину. Это делает *оптический резонатор*.

Для чего нужен оптический резонатор? В простейшем случае оптический резонатор — это два зеркала с общей оптической осью, которая фиксирует в пространстве направление лазерного луча. Активный элемент находится между зеркалами, т. е. внутри резонатора. Схематически это показано на рис. 3. Направление лазерной генерации обозначено на рисунке как *OO*. Спонтанные фотоны, случайно родившиеся в направлении *OO*, будут проходить внутри активного элемента относительно длинный путь, который, к тому же, многократно увеличивается вследствие отражения излучения от зеркал резонатора. Взаимодействуя с возбужденными активными центрами, эти фотоны инициируют, в конечном счете, мощную лавину вынужденно испущенных фотонов, которая и образует лазерный луч. Что же касается тех спонтанных фотонов, которые родились в иных направлениях, то они (равно как и соответствующие им лавины вторичных фотонов) пройдут внутри активного элемента сравнительно короткий путь и очень быстро «выйдут из игры». Все это хорошо видно на рис. 3.

Таким образом, зеркала оптического резонатора *выделяют в пространстве* определенное направление, вдоль которого реализуются *наиболее благоприятные* условия для развития фотонных лавин. Это и есть направление лазерного луча, который выходит из резонатора через одно из его зеркал (так называемое *выходное* зеркало; оно является частично прозрачным для лазерного излучения). Подчеркнем: фотонные лавины зарождаются от спонтанных фотонов и развиваются в определенном направлении вследствие пре-

обладания вынужденного испускания над поглощением света. Вполне понятна принципиально важная роль оптического резонатора. Можно сказать, что он упорядочивает бурно развивающиеся в активном элементе процессы вынужденного испускания, инициированные спонтанно родившимися фотонами. Он как бы направляет эти процессы

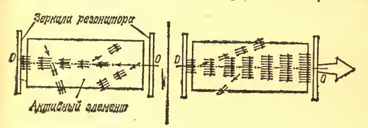
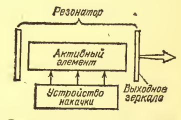


Рис. 3. Развнтне фотонной лавнны вдоль осн резонатора *OO*.

в «нужное русло» и в итоге *формирует лазерное излучение*, обладающее удивительными свойствами.

Какие бывают лазеры? Принципиальная схема лазера проста. Она включает в себя активный элемент (активную среду), устройство для накачки активного элемента и зеркала оптического резонатора (рис. 4). Несмотря на простоту принципиальной схемы, лазеры отличаются большим разнообразием. Существует очень много различных типов лазеров. Они отличаются друг от друга внешним видом, размерами, конструкцией. Наряду с лазерами-малютками, свободно умещающимися на ладони, имеются лазеры-гиганты, длина которых достигает нескольких десятков метров, а масса измеряется тоннами. Знакомясь на уроке в кабинете физики с гелий-неоновым лазером, школьник безбоязненно подставляет руку под лазерный луч. Придя в современный цех металлообработки, он может видеть как мощный CO_2-лазер легко и быстро разрезает стальные листы.



Рнс. 4. Принцнпнальная схема лазера.

Разнообразие лазеров объясняется применением в них разных типов активных сред и разных способов накачки. В качестве активных сред используют диэлектрические кристаллы, специальные стекла, полупроводники, жидкие растворы красителей, газовые смеси.

В лазерах на диэлектрических кристаллах и стеклах используется оптическая накачка. Среди огромного множества таких лазеров выделим три лазера: на гранате с неодимом, на стекле с неодимом, на рубине. О лазере на гранате с неодимом мы уже рассказывали. Добавим лишь, что этот лазер генерирует излучение в инфракрасной области спектра на нескольких длинах волн; наиболее интенсивна генерация на длине волны 1,06 мкм. Такую же длину волны генерируют лазеры на стекле, активированном неодимом. Рубин представляет собой окись алюминия с небольшой примесью ионов хрома, сообщающих рубину характерный розовый или красный цвет. Ионы хрома являются активными центрами. Лазер на рубине генерирует излучение на длине волны 0,69 мкм (красная линия).

Для накачки лазеров на газовых смесях чаще всего используется электрический разряд. На практике широко применяют упоминавшиеся выше гелий-неоновый лазер и CO_2-лазер. В гелий-неоновом лазере активная среда состоит из атомов гелия и неона; роль активных центров выполняют атомы неона. Они возбуждаются при столкновениях с возбужденными атомами гелия и быстрыми свободными электронами, образующимися в электрическом разряде, который поджигается в гелий-неоновой газовой смеси. Гелий-неоновый лазер может генерировать на длинах волн 3,39, 1,15, 0,63 мкм. Наиболее интересна генерация на длине волны 0,63 мкм (красная линия). В CO_2-лазере активная среда состоит в основном из молекул азота и углекислого газа. Активными центрами являются молекулы углекислого газа (CO_2). Они возбуждаются при включении электрического разряда в газовой смеси за счет столкновений с возбужденными молекулами азота и свободными электронами. CO_2-лазер генерирует инфракрасное излучение на длинах волн 9,6 и 10,6 мкм.

Мы отметили всего лишь несколько типов лазеров. Они будут наиболее часто встречаться в последующих рассказах. Кроме них мы познакомимся в свое время с некоторыми другими типами лазеров.

В заключение подчеркнем, что при всем многообразии лазеры выполняют одну и ту же функцию — все они являются генераторами света, причем не просто света, а *когерентного* света.

Что такое когерентный свет? Обычные лампы накаливания, а также лампы дневного света испускают спонтанно родившиеся фотоны. Такие фотоны рождаются несогласованно и разлетаются в разные стороны. Кроме того, они

заметно различаются и по частоте. Конечно, каждый такой фотон может инициировать рождение вторичных фотонов и тем самым породить некоторую фотонную лавину. Однако все эти лавины оказываются в данном случае взаимно не согласованными, распространяются в разных направлениях, так что в целом картина хаоса сохраняется. На радиотехническом языке такой свет мог бы быть назван «оптическим шумом». В оптике используют термин «некогерентный свет».

Иное дело лазерный луч. Он состоит в основном из фотонов, родившихся при вынужденном испускании. Все эти фотоны образуют единую лавину, характеризующуюся, в частности, определенным направлением движения. Это есть когерентный свет. Точнее говоря, это есть свет с высокой

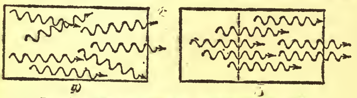


Рис. 5. *а*) Некогерентный свет. *б*) Когерентный свет.

степенью когерентности, поскольку идеальных ситуаций в жизни не бывает — в любой фотонной лавине можно обнаружить некоторый разброс и по частоте, и по направлению движения составляющих эту лавину фотонов.

Понятие когерентности в оптике является весьма важным. Мы попробовали пояснить это понятие, рассматривая свет как поток фотонов. Более удобно, однако, воспользоваться в данном случае волновыми представлениями. На рис. 5 излучение изображено в виде «элементарных волн», зарождающихся в активной среде; их обычно называют волновыми цугами. Ситуация на рис. 5, *а* отвечает некогерентному свету, тогда как на рис. 5, *б* свет идеально когерентен. Обратите внимание на то, что в последнем случае все волновые цуги распространяются в одном и том же направлении, имеют одинаковую длину волны и находятся в фазе друг с другом. Все это есть следствие вынужденного испускания света. При вынужденном испускании вторичный цуг точно копирует первичный цуг — по направлению распространения, по длине волны, по фазе. На рис. 5, *б* штриховой прямой показана поверхность одинаковой фазы (волновой фронт). Тщетно было бы пытаться изобразить подобную поверхность в случае на рис. 5, *а*.

Конечно, в действительности не бывает световых пучков с идеально плоским волновым фронтом и со строго определенной длиной волны. Однако можно утверждать, что по своим когерентным свойствам излучение лазера гораздо ближе к картине на рис. 5, *б*, чем на рис. 5, *а*.

Академик АПН СССР В. А. Фабрикант очень образно писал о том, как можно представить себе оптическую когерентность: «В раскаленной нити лампы накаливания, в ярком светящемся шнуре ртутной лампы царит полный хаос. То здесь, то там вспыхивают возбужденные атомы, испускающие цуги световых волн. Эти вспышки отдельных атомов



Рис. 6. *а*) Фокусировка некогерентного света. *б*) Фокусировка когерентного света.

никак не согласованы между собой. Свечение таких источников напоминает гул неорганизованной, чем-то возбужденной толпы. Совсем иная картина в лазере. Здесь все похоже на стройный хор — сначала вступают одни хористы, затем другие, и сила звучания могуче нарастает. Хор грандиозен по числу участников, как это бывает на праздниках песни в Прибалтике. Расстояния между отдельными группами хористов настолько велики, что слова песни долетают с заметным запозданием от одной группы к другой. Дирижера нет, но это не мешает стройности общего звучания, так как хористы сами подхватывают песню в нужные моменты. То же происходит и с атомами генератора света (имеются в виду активные центры в активном элементе лазера — *Примеч. автора*). Цуги волн, испускаемые отдельными атомами, согласованы друг с другом благодаря явлению индуцированного излучения. Каждый возбужденный атом начинает свою «песню» в унисон с дошедшей до него «песней» другого атома. Вот это и есть когерентность».

Чем замечательно лазерное излучение? Оно замечательно, прежде всего, своей когерентностью. Когерентность лазерного луча проявляется, в частности, в исключительно высокой степени его монохроматичности. Отношение $\Delta\nu/\nu$, где $\Delta\nu$ — разброс частоты светового пучка, а ν — среднее значение частоты, составляет всего 10^{-6}—10^{-8} и может быть доведено за счет специально принимаемых мер до 10^{-10}.

Высокая степень когерентности проявляется также в очень малой расходимости лазерного луча. Угол расходимости луча может быть доведен до наименьшего возможного значения, определяемого дифракцией света; это значение (измеряемое в радианах) равно отношению длины волны излучения к диаметру апертуры светового пучка. Длина волны излучения измеряется микрометрами, а диаметр апертуры пучка — миллиметрами; следовательно, указанный угол расходимости составляет примерно 10^{-3} рад, что соответствует приблизительно угловой минуте.

Некогерентный световой пучок принципиально нельзя хорошо сфокусировать. Это легко понять, если, вспомнив рис. 5, *а*, представить такой пучок в виде совокупности световых лучей, ориентированных под разными углами к оптической оси фокусирующей линзы (рис. 6, *а*). В пучке же с высокой степенью когерентности все эти лучи практически параллельны и, кроме того, монохроматичны (напомним рис. 5, *б*). Такие световые лучи можно сфокусировать практически в точку, что и показано на рис. 6, *б*. Заметим, что этот рисунок напоминает картинку из школьного учебника. Надо признать, что до изобретения лазеров страницы учебников были фактически единственным местом, где мы имели дело с когерентным светом. Правда, это пикантное обстоятельство не всегда оговаривалось.

Итак, когерентный лазерный луч может быть весьма хорошо сфокусирован. Конечно, о фокусировке в точку на практике не может быть и речи. Но зато можно реализовать фокусировку в световое пятно диаметром порядка всего лишь длины световой волны, т. е. порядка 1—10 мкм.

Лазерное излучение замечательно не только когерентностью, но и возможностью необычайно сильной концентрации световой энергии в пространстве. Наряду с маломощными гелий-неоновыми лазерами (световая мощность этих лазеров порядка всего 10^{-3}—10^{-2} Вт) существуют мощные CO_2-лазеры, непрерывно генерирующие световую мощность порядка 1 кВт и даже больше. Допустим, что световой пучок такого мощного лазера имеет диаметр порядка 1 мм. Тогда интенсивность лазерного луча будет составлять 10^5 Вт/см^2. Подобная интенсивность достаточна для того, чтобы плавить многие металлы. Для сравнения заметим, что среднее значение интенсивности солнечного света вблизи земной поверхности составляет всего 0,1 Вт/см^2.

Используя фокусировку, можно еще сильнее повысить интенсивность лазерного излучения. Как уже отмечалось, высокая степень когерентности позволяет сфокусировать

лазерный луч в световое пятно диаметром порядка длины волны света. При световой мощности 1 кВт и при фокусировке луча в пятно диаметром, скажем, 30 мкм получаем интенсивность порядка 10^{10} Вт/см^2. Такие интенсивности действительно реализуются при использовании мощных современных непрерывно генерирующих лазеров. Эти интенсивности огромны: они позволяют не только плавить, но и испарять любые материалы.

Справка. **К истории создания лазера.** Способ усиления излучения за счет использования вынужденного испускания был сначала реализован в радиодиапазоне, а точнее, в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ-диапазоне). В мае 1952 г. на Общесоюзной конференции по радиоспектроскопии советские физики А. М. Прохоров и Н. Г. Басов сообщили о принципиальной возможности создания генератора излучения в СВЧ-диапазоне. Они назвали его «молекулярным генератором», поскольку предполагалось использовать пучок молекул аммиака. Одновременно предложение об использовании вынужденного испускания для усиления и генерирования миллиметровых волн было высказано в Колумбийском университете в США американским физиком Ч. Таунсом.

В 1954 г. молекулярный генератор, названный вскоре мазером, стал реальностью. Он был разработан и создан независимо и одновременно в Физическом институте имени П. Н. Лебедева Академии наук СССР (группой под руководством Н. Г. Басова и А. М. Прохорова) и в Колумбийском университете в США (группой под руководством Ч. Таунса).

Впоследствии от термина «мазер» и произошел термин «лазер» в результате замены буквы M (начальная буква слова Microwave — *микроволновой*) буквой L (начальная буква слова Light — *свет*). В основе работы как мазера, так и лазера лежит один и тот же принцип — принцип, сформулированный в 1951 г. В. А. Фабрикантом. Появление мазера означало, что родилось новое направление в науке и технике. Его назвали «квантовой радиофизикой». Позднее стал использоваться термин «квантовая электроника». За пионерские исследования в квантовой электронике, увенчавшиеся созданием мазера, а затем и лазера Н. Г. Басов, А. М. Прохоров и американец Ч. Таунс были удостоены в 1964 г. Нобелевской премии по физике. В своей речи на церемонии, посвященной вручению Нобелевской премии, А. М. Прохоров сказал: «Казалось бы, что после создания мазеров в радиодиапазоне вскоре будут созданы квантовые генераторы в оптическом диапазоне. Однако этого не случилось. Они были созданы только через шесть лет. Чем это объясняется? Здесь были две трудности. Первая трудность заключалась в том, что тогда не были предложены резонаторы для оптического диапазона длин волн, и вторая — не были предложены конкретные системы и методы получения инверсной заселенности в оптическом диапазоне».

Упомянутые А. М. Прохоровым шесть лет действительно были заполнены теми исследованиями, которые позволили преодолеть указанные выше трудности и перейти в конечном счете от мазера к лазеру. В 1955 г. Н. Г. Басов и А. М. Прохоров обосновали применение метода оптической накачки для создания инверсии заселенности уровней. В 1957 г. Н. Г. Басов выдвинул идею использования полупроводников для создания квантовых генераторов. При этом он предложил использовать в качестве резонатора специально обработанные поверхности самого полупроводникового образца. В том же 1957 г. В. А. Фабрикант

и Ф. А. Бутаева наблюдали эффект оптического квантового усиления в опытах с электрическим разрядом в смеси, состоящей из паров ртути, водорода, гелия. В 1958 г. А. М. Прохоров и независимо от него американские физики А. Шавлов и Ч. Таунс теоретически обосновали возможность практического применения явления вынужденного испускания в оптическом диапазоне. Они выдвинули идею применения в оптическом диапазоне не объемных (как в СВЧ-диапазоне), а открытых резонаторов. Заметим, что конструктивно открытый резонатор отличается от объемного тем, что убраны боковые стенки (сохранены торцовые отражатели, фиксирующие в пространстве ось резонатора) и линейные размеры резонатора выбраны большими по сравнению с длиной волны излучения.

В 1959 г. вышла в свет работа Н. Г. Басова, Б. М. Вула и Ю. М. Попова с теоретическим обоснованием идеи полупроводниковых лазеров и условий их создания. Наконец, в 1960 г. появилась обстоятельная статья Н. Г. Басова, О. Н. Крохина и Ю. М. Попова, в которой были всесторонне рассмотрены принципы создания и теория квантовых усилителей и генераторов в инфракрасном и видимом диапазонах. В конце статьи авторы писали: «Отсутствие принципиальных ограничений позволяет надеяться на то, что в ближайшее время будут созданы генераторы и усилители в инфракрасном и видимом диапазонах волн».

Таким образом, интенсивные теоретические и экспериментальные исследования, проводившиеся в СССР и США, вплотную подвели ученых и инженеров в самом конце 50-х годов к созданию лазера. Успех выпал на долю американского физика Т. Меймана. В 1960 г. появилось его сообщение о том, что он получил на рубине генерацию излучения в оптическом диапазоне. Так мир узнал о рождении первого оптического мазера — лазера на рубине. В том же году американским физикам А. Джавану, В. Беннету и Д. Эрриоту удалось получить генерацию оптического излучения в электрическом разряде в смеси неона и гелия. Так родился первый газовый лазер (широко используемый сегодня гелий-неоновый лазер).

Начиная с 1961 г. лазеры разных типов (твердотельные и газовые) занимают прочное место в оптических лабораториях. Осваиваются новые активные среды, разрабатывается и совершенствуется технология изготовления лазеров. В 1962—1963 гг. в СССР и США одновременно создаются полупроводниковые лазеры.

Так начался новый, «лазерный», период оптики.

КАК УПРАВЛЯЮТ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЛАЗЕРА

Каким бывает лазерный луч? Войдем в затемненную лабораторию, где работает гелий-неоновый лазер. В полумраке очень красиво выделяется его сочный красный луч. Он почти не расширяется и везде имеет практически одинаковую интенсивность. Можно поставить на пути луча ряд зеркал и заставить его описать сложную изломанную траекторию в пространстве лаборатории. В результате возникнет эффектное зрелище — комната, как бы «перечеркнутая» в разных направлениях яркими красными прямыми нитями.

Однако лазерный луч далеко не всегда выглядит столь эффектно. Например, луч CO_2-лазера вообще невидим. Ведь его длина волны попадает в инфракрасную область спектра. Кроме того, не надо думать, что лазерный луч — это обязательно непрерывный поток световой энергии. Такой луч дают лишь непрерывно генерирующие лазеры. В большинстве же случаев лазеры генерируют не непрерывный световой пучок, а световые импульсы.

Рассмотрим для примера лазер на рубине. Для возбуждения активных центров (ионов хрома) используется газоразрядная лампа, дающая яркие вспышки света, которые фокусируются на активный элемент при помощи отражателя. Вспышки следуют друг за другом с интервалами, которые измеряются десятыми долями секунды, но могут составлять десятки секунд и даже минуты. Длительность отдельной вспышки порядка миллисекунды (10^{-3}с). Каждая вспышка лампы-осветителя рождает импульс лазерного излучения, имеющий обычно примерно такую же длительность. Характерные значения энергии лазерного импульса 10—100 Дж, а максимальная мощность 10^4—10^5 Вт.

Мощность лазерного импульса можно значительно повысить, одновременно уменьшив его длительность. Для этого специальным образом *управляют потерями* излучения внутри резонатора лазера. В результате получают так называемые «гигантские» лазерные импульсы; они имеют длитель-

ность 10^{-8} с, а их мощность достигает 10^8 Вт. Один гигантский импульс высвечивается на одну вспышку лампы-осветителя.

Можно сделать и так, что вместо гигантского импульса будет генерироваться регулярная последовательность еще более коротких и еще более мощных лазерных импульсов; длительность каждого такого импульса порядка пикосекунды (10^{-12} с), а мощность достигает 10^{12} Вт. Эти импульсы называют *сверхкороткими*, или *пикосекундными*. Они следуют друг за другом с интервалом порядке 10^{-9} с.

Попробуйте представить себе, на что похож такой лазерный луч. Лазер как бы «стреляет» следующими друг за другом короткими «пулеметными очередями». Каждый отдельный выстрел в такой «очереди» — это световой импульс. Помножив его длительность (10^{-12} с) на скорость света ($3 \cdot 10^8$ м/с), получим расстояние $3 \cdot 10^{-4}$ м, т. е. 0,3 мм. Это расстояние примерно в десять раз меньше ширины светового луча. Получается, что лазер «стреляет» в данном случае этакими световыми «лепешками»; диаметр «лепешки» около 1 мм, а толщина 0,1 мм. Что же касается световой мощности каждой такой «лепешки», то она в сотни раз превосходит мощность знаменитой Красноярской ГЭС. Вот каким необычным может оказаться лазерный луч!

Даже при непрерывной накачке луч лазера часто представляет собой не непрерывный световой пучок, а последовательность световых импульсов. При соответствующем управлении потерями в резонаторе непрерывно накачиваемые лазеры генерируют регулярные последовательности импульсов с характерной частотой следования импульсов 10 кГц (десять тысяч импульсов в секунду). Длительность отдельного импульса составляет при этом 10^{-7}—10^{-6} с, а мощность достигает 10^4 Вт.

На практике важно уметь регулировать длительность и энергию лазерных импульсов. Надо также уметь регулировать частоту следования импульсов, ведь от этого зависит средняя мощность излучения.

Что значит «управлять» лазерным лучом? Почти наверняка читатель ответит, что это значит отклонять нужным образом лазерный луч в пространстве, расщеплять его на несколько пучков, фокусировать излучение на мишень. Все это так. Однако управление лазерным лучом этим отнюдь не исчерпывается.

Когда регулируют длительность, энергию, частоту следования лазерных импульсов, то тем самым также осуществляют управление лазерным излучением. Бывает не-

обходимо увеличить, например удвоить, частоту лазерного излучения или же плавно ее изменять (плавно перестраивать). Это тоже есть управление лазерным лучом. Наконец, может потребоваться дополнительное увеличение степени монохроматичности излучения, дополнительная стабилизация его частоты. И это есть управление лазерным лучом. Таким образом, понятие «управление излучением лазера» оказывается значительно шире, чем это может показаться на первый взгляд.

Управлять лазерным лучом можно по-разному. Можно воздействовать на лазерный луч уже после того, как он вышел из резонатора лазера (*внерезонаторное* управление). Можно также управлять излучением, воздействуя определенным образом на сам процесс лазерной генерации (*внутрирезонаторное* управление). Внерезонаторное управление используют обычно для отклонения, расщепления, фокусировки луча, а также изменения его частоты. Внутрирезонаторное управление применяют для изменения параметров лазерных импульсов.

Как получают гигантские лазерные импульсы? Для этого внутрь резонатора помещают *оптический затвор* — специальное устройство, которое по сигналу может переходить из «закрытого» состояния в «открытое» и наоборот. В открытом состоянии затвор пропускает сквозь себя лазерное излучение; в закрытом состоянии он поглощает излучение или отклоняет его в сторону. Переключая затвор из одного состояния в другое, мы тем самым изменяем (переключаем) потери в резонаторе. Когда затвор закрыт, потери велики; когда затвор открывается, потери существенно снижаются.

Сама по себе идея получения гигантских импульсов при использовании оптического затвора довольно проста. Сначала, еще до того, как появился импульс излучения накачки, затвор переводится в закрытое состояние. Начинается высвечивание энергии накачки. По мере поглощения энергии активные центры переходят в массовом порядке на долгоживущий уровень. Генерация же в лазере пока не начинается — ведь затвор закрыт. В результате на рассматриваемом уровне накапливается чрезвычайно большое число активных центров — создается очень сильная инверсная населенность уровней. И вот в какой-то момент времени затвор быстро переключают в открытое состояние. В некотором отношении это подобно тому, как если бы высокая плотина, создававшая огромный перепад уровней воды, вдруг мгновенно исчезла. Происходит дружное и очень

бурное высвечивание возбужденных активных центров, в результате чего и рождается короткий и мощный лазерный импульс — гигантский импульс. Напомним: его длительность 10^{-8} с, максимальная мощность 10^8 Вт.

Все описанные события совершаются в течение очень малого времени. Длительность вспышки лампы-осветителя составляет 10^{-3} с. Затвор открывают, когда примерно половина энергии вспышки уже высветилась, причем время переключения затвора из закрытого состояния в открытое должно быть не более 10^{-7} с. К следующему импульсу накачки затвор должен снова оказаться в закрытом состоянии.

Какие бывают оптические затворы? На практике раньше всех стали использоваться вращающиеся *оптико-механические* затворы. Принцип их работы довольно прост. Одно из зеркал лазерного резонатора заставляют быстро вращаться вокруг оси, перпендикулярной оси резонатора. Такое зеркало работает как зеркало резонатора лишь в те короткие промежутки времени, когда его отражающая поверхность оказывается точно или почти перпендикулярной оси резонатора. Только в эти промежутки времени потери в резонаторе будут малыми. В остальное же время потери будут огромными — как если бы отражающее зеркало вообще отсутствовало. Чтобы переключение потерь происходило достаточно быстро, надо очень быстро вращать зеркало. Оно должно совершать порядка тысячи оборотов ежесекундно. При этом время переключения потерь составляет около 10^{-7} с. Заставить зеркало вращаться еще быстрее практически нельзя. Поэтому для более быстрого переключения потерь применяют оптические затворы без каких-либо вращающихся деталей. Существуют несколько типов таких затворов. Они собраны на рис. 7 (*АЭ* — активный элемент, *ОЗ* — полностью отражающее зеркало резонатора, *ВЗ* — выходное зеркало).

Прежде всего познакомимся с *электрооптическим* затвором. Не входя в физические подробности, отметим лишь, что в основе работы такого затвора лежит быстрое и обратимое изменение преломляющих свойств кристаллов под действием внешнего электрического поля. Поместим прозрачный кристалл между двумя электродами; это есть так называемая ячейка Поккельса. Пусть в кристалл входит световая волна, поляризованная в плоскости S (рис. 7, *а*). Это означает, что вектор электрической напряженности в такой волне совершает колебания в плоскости S. Если на электроды подать электрическое напряжение, преломляю-

щие свойства кристалла изменятся и в результате изменится поляризация световой волны, проходящей по кристаллу. Можно подобрать такое напряжение (на практике оно оказывается порядка 10^4—10^5 В), чтобы выходящая из кристалла световая волна оказалась поляризованной в плоскости, перпендикулярной плоскости S,— как это показано на рисунке. В этом случае говорят, что произошел поворот плоскости поляризации света на 90°.

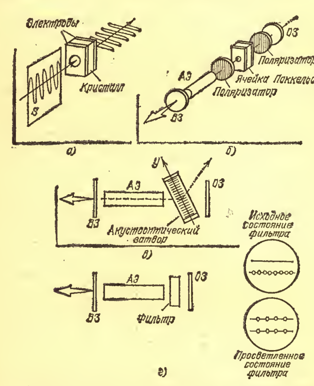


Рис. 7. *а*) Поворот плоскости поляризации света на 90° в ячейке Поккельса. *б*) Лазер с электрооптическим затвором. *в*) Лазер с акустооптическим затвором. *г*) Лазер с просветляющимся фильтром.

Теперь нетрудно представить себе, как работает электрооптический затвор с ячейкой Поккельса. Этот затвор состоит из ячейки Поккельса, помещенной между двумя одинаково ориентированными линейными поляризаторами света. Затвор находится внутри лазерного резонатора (рис. 7, *б*). Когда на электроды ячейки Поккельса не по-

дано напряжение, затвор открыт. При подаче соответствующего напряжения ячейка Поккельса осуществляет поворот плоскости поляризации проходящего сквозь нее света на 90°, в результате чего затвор оказывается закрытым. Пройдя через один поляризатор, свет уже не может вследствие поворота плоскости поляризации на 90° пройти через второй поляризатор. Время переключения электрооптического затвора из одного состояния в другое может составлять всего 10^{-9} с.

Наряду с электрооптическими в последние годы широко применяют *акустооптические* затворы. Схема лазера с таким затвором показана на рис. 7, *в*. В ситуации, которая изображена на рисунке, по затвору в направлении оси *y* распространяется ультразвуковая волна, создающая в веществе затвора систему чередующихся сжатий и разрежений. На этих сжатиях и разрежениях происходит *дифракция* светового пучка, выходящего из активного элемента и встречающего на своем пути затвор. Вследствие дифракции часть светового пучка должна отклониться в сторону, что соответствует резкому увеличению потерь в рассматриваемом резонаторе. Такая ситуация отвечает закрытому состоянию акустооптического затвора. Если генератор ультразвука выключить, ультразвуковая волна исчезнет и дифракция светового пучка происходить не будет — затвор перейдет в открытое состояние. Время переключения акустооптического затвора из одного состояния в другое составляет 10^{-7}—10^{-8} с.

Мы условились не входить в физические подробности. Однако одно уточнение необходимо все же сделать, поскольку оно является принципиальным. Дело в том, что когда акустооптический затвор закрыт, генерация в лазере не происходит, так что светового пучка, испытывающего дифракцию на ультразвуковой волне, фактически нет. Иными словами, показанные штриховыми линиями на рис. 7, *в* световые пучки в действительности отсутствуют. Это надо понимать так: если бы световой пучок присутствовал, то он вел бы себя именно таким образом. Поскольку же такое поведение пучка отвечало бы резкому повышению потерь в резонаторе, то пучок и не возникает. Вообще говорить о том, что какой-либо затвор в закрытом состоянии поглощает излучение или отклоняет его в сторону, можно лишь тогда, когда он находится вне резонатора. Если же затвор находится внутри резонатора, то его переключение в закрытое состояние попросту срывает генерацию в лазере.

Все рассмотренные оптические затворы действуют по сигналу извне. Их работу надо точно согласовывать с импульсами накачки; надо в определенные моменты времени открывать и своевременно возвращать их в закрытое состояние. От этих забот можно избавиться, если использовать в качестве затвора *просветляющийся фильтр*.

Он представляет собой некую среду, обычно жидкую, содержащую атомы, способные поглощать излучение лазера и при этом относительно долго оставаться в возбужденном состоянии. По мере поглощения излучения все большее число атомов в фильтре переходит с исходного нижнего уровня на верхний. Когда на обоих уровнях оказывается одинаковое число атомов, фильтр перестает поглощать падающее на него излучение (вследствие того, что процессы поглощения света и вынужденного испускания теперь взаимно компенсируются). Он становится для этого излучения прозрачным, иначе говоря, *просветляется*.

Поместим такой фильтр в резонатор лазера. В исходном состоянии фильтр непрозрачен — затвор закрыт. Начинается поглощение энергии импульса накачки в активном элементе лазера, активные центры накапливаются в избытке на долгоживущем уровне. Учащаются акты спонтанного испускания фотонов активными центрами. Попадая в фильтр, фотоны начинают понемногу его просветлять. В свою очередь начавшееся просветление фильтра ускоряет процессы испускания фотонов активными центрами. Затем наступает развязка: фильтр быстро просветляется (затвор открывается) — рождается гигантский лазерный импульс. После его высвечивания фильтр за счет спонтанных процессов возвращается в непросветленное состояние.

В данном случае управление потерями в резонаторе осуществляется особенно просто. Надо лишь поместить внутрь резонатора лазера кювету с просветляющейся жидкостью (рис. 7, *г*). Все дальнейшее будет совершаться автоматически. Без нашего вмешательства жидкость в кювете просветлится в результате воздействия импульса накачки на активный элемент, родится гигантский импульс, после чего жидкость сама возвратится в непросветленное состояние — вплоть до очередного импульса накачки.

Можно ли «растянуть» световой импульс во времени? Свободно генерирующие лазеры с импульсной накачкой дают световые импульсы длительностью 10^{-4}—10^{-3} с; при управлении потерями в резонаторе удается получать импульсы длительностью 10^{-8} с (гигантские импульсы). А как быть, если нужны импульсы длительностью, скажем, 10^{-6} с?

В этом случае можно вмешаться в процесс генерации гигантского импульса, замедлить процесс его развития и тем самым как бы «растянуть» импульс во времени — разумеется, с соответствующим уменьшением мощности импульса.

Для этого надо особым образом управлять потерями в резонаторе лазера: когда в процессе развития генерируемого светового импульса его мощность нарастает, потери должны постепенно увеличиваться, а когда мощность светового импульса начинает спадать, потери должны уменьшаться. В данном случае говорят об использовании *отрицательной* обратной связи. Она замедляет как нарастание мощности светового импульса на начальном этапе развития, так и спадание его мощности на конечном этапе. В результате импульс удлиняется во времени.

На практике реализовать отрицательную обратную связь совсем нетрудно. Достаточно поместить внутрь лазерного резонатора пластинку, обладающую следующим свойством. Когда на пластинку падает лазерное излучение малой мощности, она прозрачна и практически свободно пропускает излучение. Если же мощность падающего излучения возрастает, то степень прозрачности пластинки уменьшается; для достаточно мощного излучения пластинка может стать вообще непрозрачной. Этот интересный физический эффект называют эффектом затемнения среды (другое название: эффект двухфотонного поглощения).

Поясним данный эффект на следующей упрощенной физической модели. Пусть атомы среды имеют всего два энергетических уровня и пусть на среду падает поток фотонов, энергия которых ровно вдвое меньше разности энергий уровней атомов. Ясно, что среда не будет поглощать такие фотоны; ведь энергии фотона недостаточно для «перебрасывания» атома с нижнего уровня на верхний. Чтобы состоялся переход атома, надо поглотить не один, а *сразу два* фотона. Процесс двухфотонного поглощения маловероятен; однако его вероятность возрастает по мере увеличения числа фотонов в световом пучке, т. е. по мере увеличения мощности пучка. Отсюда понятно, почему среда, прозрачная для маломощного излучения (когда двухфотонное поглощение практически отсутствует), утрачивает свою прозрачность для излучения достаточно большой мощности (когда двухфотонное поглощение начинает играть заметную роль).

Итак, вернемся к нашей задаче. Наряду с электрооптическим (или акустооптическим) затвором поместим внутрь

резонатора полупроводниковую пластинку, в которой наблюдается эффект затемнения для излучения данного лазера. Например, в лазере на гранате с неодимом можно использовать пластинку из арсенида галлия (GaAs). Вначале пластинка прозрачна, поэтому процесс генерации гигантского импульса начинает развиваться, как если бы пластинки не было. Однако по мере увеличения мощности импульса пластинка начинает затемняться, возрастают потери. Поэтому дальнейшее развитие импульса затормаживается. В результате импульс растягивается во времени и оказывается не столь мощным. Используя данный метод, получают световые импульсы длительностью 10^{-7}—10^{-6} с и с максимальной мощностью до 10^6 Вт.

Как получают регулярные последовательности световых импульсов? Часто требуется иметь последовательность лазерных импульсов, следующих друг за другом с достаточно высокой частотой. Для этого используют лазеры с *непрерывной* накачкой. Внутрь резонатора такого лазера помещают, например, акустооптический затвор, который периодически, с определенной частотой переключают из одного состояния в другое. В результате возникает последовательность лазерных импульсов с соответствующей частотой следования. Характерное значение этой частоты 10 кГц (десять тысяч импульсов в секунду), длительность отдельного импульса 10^{-7}—10^{-6} с, средняя мощность излучения 1—10 Вт.

А нельзя ли получать импульсы с еще более высокой частотой следования? Можно, если устранить недостаток обычных схем, где затвор, закрываясь, всякий раз *обрывает* генерацию. Как бы бурно ни развивалась генерация при очередном открывании затвора, она все равно начинается от процессов спонтанного испускания фотонов, что неизбежно требует некоторой «раскачки», точнее говоря, некоторого дополнительного времени (равного примерно 10^{-7}—10^{-6} с). Можно, однако, сделать так, чтобы затвор не прерывал периодически генерацию в лазере, а просто периодически выводил из лазерного резонатора часть непрерывно генерируемого излучения. Оба зеркала резонатора делают полностью отражающими; генерация идет не прекращаясь, все время резонатор непрерывно «наполняется» излучением. Переключаясь периодически в закрытое состояние, акустооптический затвор всякий раз частично как бы «разгружает» резонатор, выпуская на волю очередной световой импульс. Такой режим работы лазера называют режимом *разгрузки резонатора*. Он позволяет получать по-

следовательности световых импульсов с частотой следования до 10 МГц.

Советуем внимательно рассмотреть рис. 8 (*АЭ* — активный элемент, *ОЗ* — полностью отражающее зеркало, *ВЗ* — выходное зеркало). На рисунке сравниваются два режима генерации: режим, при котором акустооптический затвор периодически обрывает генерацию (*а*), режим разгрузки

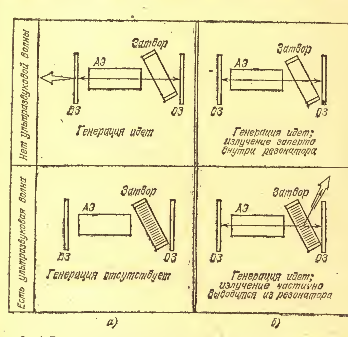


Рис. 8. *а*) Режим, при котором затвор периодически обрывает генерацию. *б*) Режим разгрузки резонатора.

резонатора (*б*). Для обоих режимов показаны две ситуации: генератор ультразвука выключен (затвор открыт), генератор ультразвука включен (затвор закрыт).

Как получают пикосекундные импульсы? Прежде чем отвечать на этот вопрос, надо ввести и обсудить понятие «продольной моды» лазерного излучения.

Как известно, лазерное излучение возникает за счет вынужденного испускания при переходе активных центров между двумя определенными энергетическими уровнями; такой переход обычно называют рабочим. До сих пор мы молчаливо предполагали, что каждому уровню отвечает

строго определенное значение энергии и поэтому любому рабочему переходу соответствует излучение строго определенной частоты. В действительности же энергетический уровень всегда в какой-то степени «размыт»: ему отвечает энергия, непрерывно изменяющаяся в пределах некоторого интервала значений. Поэтому рождающееся на рабочем переходе лазерное излучение характеризуется не одной какой-то определенной частотой, а частотами в некотором интервале $\Delta\nu$. Когда говорят о частоте, отвечающей тому или иному переходу, то подразумевают среднюю частоту. Набор частот, отвечающий данному переходу, называют его *спектральной линией*; величина $\Delta\nu$ есть ширина спектральной линии. Например, для лазеров на кристаллах $\Delta\nu \approx 10^{10}$ Гц. Особенно велика ширина $\Delta\nu$ для лазеров на растворах красителей: 10^{12}—10^{13} Гц.

Для излучения, генерируемого лазером, должно выполняться определяемое резонатором *условие резонанса* — на длине резонатора L должно укладываться целое число q полуволн $\lambda/2$: $L=q\lambda/2$. Это аналогично известному акустическому резонансу, когда в струне возбуждаются лишь такие звуковые колебания, для которых половина длины звуковой волны укладывается на длине струны (между ее закрепленными точками) целое число раз. В данном случае роль струны с закрепленными концами выполняет оптический резонатор; его длина есть расстояние между зеркалами. Переходя от длины волны λ к частоте ν (напомним: $\nu=v/\lambda$, где v — скорость света в среде, заполняющей резонатор), перепишем условие резонанса в виде $\nu=qv/2L$. Определяемые этим условием частóты ν называют *резонансными частотами*. Очевидно, что могут реализоваться лишь те резонансные частоты, которые попадают в пределы ширины $\Delta\nu$ спектральной линии данного рабочего перехода.

С каждой генерируемой на данном рабочем переходе в данном резонаторе резонансной частотой связывают понятие «продольная мода». Вместо того чтобы говорить, что в излучении данного лазера представлены такие-то резонансные частоты, говорят, что излучение состоит из таких-то продольных мод. Число одновременно генерируемых резонансных частот (а следовательно, и продольных мод) можно оценить, поделив ширину $\Delta\nu$ спектральной линии рабочего перехода на расстояние между соседними резонансными частотами; как видно из условия резонанса, это расстояние равно $v/2L$, что составляет 10^7—10^8 Гц. Для лазеров на кристаллах число генерируемых продольных мод

составляет 10^2—10^3, а для лазеров на растворах красителей оно достигает 10^5.

Теперь мы можем ответить на вопрос о том, как получают пикосекундные лазерные импульсы. Для этого необходимо, во-первых, чтобы в излучении лазера содержалось достаточно много продольных мод и, во-вторых, чтобы все эти моды рождались в одной и той же фазе, иначе говоря, чтобы они были *синхронизованы* друг с другом по фазе. *Интерференция* взаимно синхронизованных продольных мод приводит к резкому перераспределению энергии в лазерном излучении: в одних участках пространства происходит очень сильная концентрация световой энергии, тогда как в других участках вообще не остается энергии. В результате формируется регулярная последовательность сверхкоротких световых импульсов огромной мощности. Длительность каждого такого импульса обратно пропорциональна количеству синхронизованных мод, а мощность прямо пропорциональна квадрату количества мод; поэтому-то и важно, чтобы в лазерном излучении содержалось достаточно большое число продольных мод. Сверхкороткие световые импульсы следуют друг за другом с интервалом $2L/v$, т. е. с интервалом порядка 10^{-7}—10^{-8} с. В лазерах на кристаллах и стеклах (их обычно называют твердотельными лазерами) удается реализовать сверхкороткие импульсы длительностью 10^{-11}—10^{-10} с, а в лазерах на растворах красителей получают импульсы длительностью 10^{-12} с, что как раз и соответствует пикосекунде.

Рассматриваемый режим генерации называют режимом *синхронизации продольных мод*, поскольку главное, что здесь делается,— это синхронизация продольных мод по фазе. Для синхронизации мод применяют разные способы. В частности, может быть использован уже знакомый читателю акустооптический затвор. В данном случае необходимо, чтобы затвор периодически изменял потери в резонаторе с частотой, равной $v/2L$.

Как управляют частотой лазерного излучения? Частота излучения лазера определяется, прежде всего, выбором активной среды. Активные центры характеризуются той или иной системой энергетических уровней и, значит, определенными спектральными линиями. Используя разные активные среды, можно получить когерентное излучение в принципе любой частоты в диапазоне от 10^{15} до 10^{12} Гц (в диапазоне длин волн примерно от 0,1 до 100 мкм).

Но даже после того, как выбрана конкретная активная среда, можно осуществлять управление частотой излучения

лазера: можно подавлять нежелательные рабочие переходы, плавно перестраивать (плавно подстраивать) частоту, увеличивать частоту в несколько раз, принимать меры к повышению степени монохроматичности излучения. Уже из этого перечисления видно, насколько широк круг решаемых здесь задач. Остановимся подробнее хотя бы на некоторых из них.

Обычно активные центры имеют не один, а несколько рабочих переходов. Однако часто желательно, чтобы генерация происходила лишь на каком-то определенном переходе; остальные же переходы надо, как говорят, подавить, т. е. предотвратить возникновение генерации на них. Для этого повышают потери в резонаторе специально на тех частотах, которые отвечают нежелательным переходам. В качестве примера приведем гелий-неоновый лазер. Он имеет три рабочих перехода, которым отвечают длины волн 3,39, 1,15, 0,63 мкм. Чтобы предотвратить генерацию на длинах волн 3,39 и 1,15 мкм, на зеркала резонатора наносят специальные отражающие покрытия, имеющие высокий коэффициент отражения в видимой области спектра и низкий в инфракрасной. В результате генерация возникает только на переходе с длиной волны 0,63 мкм.

Для ряда практических применений важна плавная перестройка частоты лазерного излучения. Существует несколько вариантов решения этой задачи.

Один из них предполагает плавную перестройку частоты в пределах диапазона частот, определяемого шириной спектральной линии $\Delta\nu$ рабочего перехода. В этом случае применяют лазеры с достаточно широкой спектральной линией, например лазеры на красителях (напомним, что для них $\Delta\nu \approx 10^{13}$ Гц). Для осуществления перестройки частоты можно воспользоваться обычной трехгранной призмой.

Предположим сначала, что на призму падает направленный световой пучок, в котором представлены только две частоты: ν_1 и ν_2. За призмой находится отражающее зеркало. Пройдя сквозь призму, световой пучок расщепится на два пучка (рис. 9, *а*), каждому из которых отвечает своя частота (для определенности полагаем, что $\nu_1 > \nu_2$). Изменяя соответствующим образом ориентацию зеркала, можно добиться, чтобы либо один, либо другой пучок отражался от зеркала строго назад и, пройдя сквозь призму (теперь уже в обратном направлении), совмещался с исходным световым пучком. В ситуации, изображенной на рисунке, зеркало ориентировано так, что строго назад отражается пучок

с частотой ν_1. Изменив ориентацию зеркала, можно добиться, чтобы строго назад отражался пучок с частотой ν_2 (см. штриховое изображение зеркала).

Теперь внесем призму в резонатор лазера и сделаем так, чтобы полностью отражающее зеркало резонатора можно было бы слегка поворачивать (рис. 9, *б*). При заданной ориентации поворачивающегося зеркала будет генерироваться та частота, которую имеет световой луч, отражаемый зеркалом строго назад. Этот луч удерживается внутри резонатора и может многократно пройти через активный элемент. Лучи же с другими частотами после отражения от

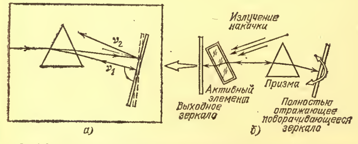


Рис. 9. *а*) Использование призмы для разделения световых лучей разной частоты. *б*) Лазер с плавной перестройкой частоты излучения.

зеркала должны были бы тут же покинуть резонатор; поэтому на остальных частотах генерация попросту не возникает. Плавно поворачивая зеркало, можно тем самым плавно изменять частоту излучения, генерируемого лазером.

Конечно, только простоты ради мы говорили выше об определенном значении частоты. В действительности же при той или иной ориентации зеркала генерируется не одна частота, а спектральная линия, ширина которой (разброс частот) примерно в 100 раз меньше ширины спектральной линии рабочего перехода. При изменении ориентации зеркала выделяемая им узкая спектральная линия плавно перемещается в пределах широкой спектральной линии рабочего перехода.

Существует также иное решение задачи плавной перестройки частоты. Выходящее из резонатора лазера излучение частоты ν посылают в специальное устройство, называемое *параметрическим генератором света*. Световая волна частоты ν превращается там в две световые волны, одна из

которых имеет частоту ν', а другая — частоту $\nu-\nu'$. Управляя параметрическим генератором света, можно плавно перестраивать частоту ν' в довольно широком интервале значений. Обо всем этом мы поговорим подробнее позднее — в рассказе, посвященном *нелинейной оптике*. Там же мы поговорим и о том, как при помощи методов нелинейной оптики можно удвоить (утроить, учетверить и т. д.) частоту лазерного луча.

Как можно быстро отклонить лазерный луч? Конечно, отклонить лазерный луч несложно. Это можно сделать при помощи обычных зеркал и призм, соответствующим образом помещенных на пути луча. Однако на практике часто требуется не просто отклонить лазерный луч, но отклонить его очень быстро и при этом весьма точно. Требуемое время изменения ориентации или положения луча в пространстве может составлять всего лишь миллионные доли секунды! Здесь обычное (механическое) поворачивание зеркал или призм не годится, оно происходит слишком медленно. В подобных случаях применяют немеханические методы управления лазерным лучом в пространстве.

На основе этих методов работают специальные устройства для отклонения светового луча, их называют *оптическими дефлекторами* (от латинского deflecto — «отклоняю»). Одни дефлекторы осуществляют плавное, непрерывное изменение направления лазерного луча, другие изменяют направление луча или его положение в пространстве дискретным образом. Широко используются дефлекторы электро- и акустооптического типов.

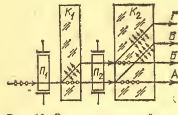


Рис. 10. Электрооптический дефлектор, позволяющий дискретно изменять положение в пространстве светового луча.

В качестве примера рассмотрим *электрооптический дефлектор*, позволяющий дискретно изменять положение светового луча в пространстве, не меняя при этом его направления. Этот дефлектор показан схематически на рис. 10. Он состоит из двух ячеек Поккельса ($П_1$ и $П_2$) и двух кристаллов кальцита $CaCO_3$ (K_1 и K_2). Здесь используется явление *двойного лучепреломления*, открытое датским ученым Т. Бартолином еще в 1669 г. Световой луч, падающий на кристалл кальцита перпендикулярно его грани, может пройти сквозь кристалл, не отклоняясь, но может «поступить»

необычно: проходя по кристаллу, луч отклоняется, а по выходе из кристалла приобретает исходное направление. В общем случае световой луч, попадая в кристалл кальцита, расщепляется на два луча, один из которых ведет себя обычным образом (не отклоняется), а другой ведет себя необычно (отклоняется). Отсюда и происходит термин «двойное лучепреломление». Как было выяснено уже в начале XIX века, характер поведения светового луча в двулучепреломляющем кристалле зависит от *поляризации* луча или, точнее, от того, как ориентирован кристалл по отношению к плоскости поляризации падающего света. Мы еще вернемся к этому вопросу позднее (в рассказе, посвященном нелинейной оптике), а пока заметим лишь, что в ситуации, изображенной на рис. 10, световой луч, который поляризован перпендикулярно плоскости рисунка, проходит через кристалл кальцита, не отклоняясь, а луч, который поляризован в плоскости рисунка, отклоняется. На рисунке длинными стрелками показаны световые пучки; короткие стрелки указывают на то, что данный световой пучок поляризован в плоскости рисунка, а кружочки — на то, что он поляризован перпендикулярно плоскости рисунка.

После всех этих замечаний можно перейти к обсуждению того, как работает данный дефлектор. Будем иметь в виду, что при подаче напряжения каждая ячейка Поккельса поворачивает плоскость поляризации проходящего сквозь нее светового пучка на 90°. Кроме того, будем полагать, что исходный световой пучок поляризован перпендикулярно плоскости рисунка. Пусть обе ячейки Поккельса выключены (на них не подано электрическое напряжение). В этом случае световой пучок пройдет сквозь оба кристалла кальцита, не отклоняясь, и выйдет из дефлектора в положении, обозначенном на рисунке буквой *А*. Предположим теперь, что ячейка $П_1$ включена, а ячейка $П_2$ выключена. Тогда луч отклонится в обоих кристаллах кальцита и покинет дефлектор в положении, обозначенном буквой *Г*. Предположим, что обе ячейки Поккельса включены; тогда луч отклонится в кристалле $К_1$ и не отклонится в $К_2$; он будет иметь конечное положение *Б*. Наконец, пусть ячейка $П_1$ выключена, а $П_2$ включена; луч не отклонится в кристалле $К_1$ и отклонится в кристалле $К_2$; он будет иметь конечное положение *В*. Таким образом, включая всякий раз ту или иную комбинацию ячеек Поккельса, можно определенным образом менять дискретно положение лазерного луча в пространстве при неизменном его направлении. Из-

менение положения луча производится очень быстро — за время, меньшее, чем 10^{-8} с.

Для простоты мы рассмотрели схему дефлектора всего из двух каскадов; такая схема предусматривает только четыре положения луча на выходе. Если бы в схеме имелось n каскадов, то число конечных положений луча равнялось бы 2^n. В современных дефлекторах уверенно реализуются, например, 1024 положений луча, что соответствует десяти каскадам ($2^{10}=1024$).

Справка. Параметры некоторых типов отечественных лазеров. Советская приборостроительная промышленность освоила серийный выпуск многих типов лазеров. Ниже приведены в качестве примера некоторые типы отечественных лазеров.

Непрерывно генерирующие газоразрядные лазеры

Тип лазера	Активная среда	Длина волны, мкм	Мощность излучения, Вт	Расходимость излучения, мрад	Длина газоразрядной трубки, см
ОКГ-14	He—Ne	0,63	0,003	3	45
ЛГ-56	He—Ne	0,63	0,002	3	25
ЛГ-65	He—Ne	1,15	0,02	4	95
ЛГ-38	He—Ne	0,63	0,05	0,5	200
ЛГ-30	CO_2	10,6	5	7	100
ЛГ-25	CO_2	10,6	25	10	130
ЛГ-43	CO_2	10,6	40	5	200

Свободно генерирующие твердотельные лазеры с импульсной накачкой

Тип лазера	Активный элемент	Энергия лазерного импульса, Дж	Длительность лазерного импульса, с	Расходимость, мрад
ГОР-100М	Рубин	100	$1\cdot10^{-3}$	40
ГОР-300	Рубин	300	$5\cdot10^{-4}$	30
ГОС-301	Стекло с неодимом	300	$8\cdot10^{-4}$	5
ГОС-1000	Стекло с неодимом	1000	$2\cdot10^{-3}$	3
ЛТИ-4	Гранат с неодимом	0,1	$4\cdot10^{-5}$	5

Твердотельные лазеры с импульсной накачкой, генерирующие гигантские импульсы

Тип лазера	Активный элемент	Энергия импульса, Дж	Длительность импульса, нс	Мощность импульса в максимуме, кВт	Тип оптического затвора
ОГМ-20	Рубин	0,42	20	$2 \cdot 10^4$	Электрооптический
ЛТИПЧ-1	Стекло с неодимом	2	15	$1 \cdot 10^5$	Просветляющийся фильтр
ЛТИ-5	Гранат с неодимом	0,05	10	$5 \cdot 10^3$	Электрооптический

Лазеры на гранате с неодимом с непрерывной накачкой, генерирующие регулярные последовательности импульсов

Тип лазера	Частота следования импульсов, кГц	Средняя мощность излучения, Вт	Расходимость излучения, мрад	Тип оптического затвора
ЛТИ-501	5—50	8	1	Акустооптический
ЛТИ-502	8—50	16	2	То же
ЛТИ-504	5—25	4	2	»

Непрерывно генерирующие лазеры на гранате с неодимом

Тип лазера	Длина волны, мкм	Мощность излучения, Вт	Расходимость излучения, мрад
ЛТН-101	1,06	63	10
ЛТН-103	1,06	250	12
ЛТН-401Б	0,53	2	10

Примечание: длина волны 0,53 мкм в лазере ЛТН-401 Б генерируется в результате нелинейно-оптического удвоения частоты внутри резонатора лазера.

ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ

Как действует на вещество мощный лазерный луч? Направим на поверхность какого-то материала, например металла, луч мощного лазера. Вообразим, что интенсивность луча постепенно растет (за счет увеличения мощности лазера или за счет фокусировки излучения). Попробуем представить себе физические процессы, которые будут при этом происходить.

Когда интенсивность луча, возрастая, достигнет значения порядка 10^5 Вт/см², начнется плавление металла. Вблизи поверхности, непосредственно под световым пят-

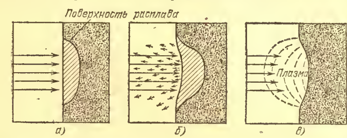


Рис. 11. *а*) Плавление металла под действием лазерного излучения. *б*) Интенсивное испарение металла. *в*) Образование плазмы.

ном, возникнет область жидкого (расплавленного) металла. Поверхность, отграничивающая эту область от твердого металла (ее называют поверхностью расплава), постепенно перемещается в глубь материала по мере поглощения им световой энергии. При этом площадь поверхности расплава увеличивается и, следовательно, теплота начинает более интенсивно отводиться в глубинные области материала за счет теплопроводности. В результате устанавливается неизменная (для данной интенсивности излучения) поверхность расплава (рис. 11, *а*).

Повысим интенсивность лазерного луча до 10^6—10^7Вт/см². Теперь одновременно с плавлением будет происходить интенсивное испарение (кипение) материала. Часть вещества

превратится в пар, вследствие чего на поверхности металла возникнет лунка, начнется процесс формирования отверстия или разреза (рис. 11, *б*).

Когда интенсивность луча достигнет примерно 10^9 Вт/см^2, свет начнет сильно ионизовать пары вещества, превращая их в плазму. Возникнув, плазма преградит дальнейший доступ лазерного излучения к поверхности материала — ведь свет интенсивно поглощается плазмой (рис. 11, *в*). При обработке материалов лазерным лучом важно, чтобы не возникала плазма. Значит, интенсивность луча не должна быть чрезмерно большой.

Говоря о действии луча на вещество, мы пока имели в виду концентрацию световой мощности лишь *в пространстве* (ведь интенсивность луча есть мощность, отнесенная к единице площади его сечения). Надо, однако, учитывать и концентрацию мощности *во времени*. Ее можно регулировать, изменяя длительность одиночных лазерных импульсов или частоту следования импульсов (если генерируется последовательность импульсов). Предположим, что интенсивность достаточна для того, чтобы металл не только плавился, но и кипел; при этом излучение лазера представляет собой одиночные импульсы длительностью 10^{-7} с. В данном случае в материале поглощается значительная световая энергия за очень короткое время. За такое время поверхность расплава попросту не успевает переместиться в глубь материала; в результате еще до того, как расплавится сколько-нибудь заметная масса вещества, начнется его интенсивное испарение. Иными словами, основная часть поглощаемой веществом световой энергии лазерного импульса расходуется в подобных условиях не на плавление, а на испарение. На практике при заданной энергии лазерного импульса часто бывает целесообразно позаботиться об увеличении его длительности, чтобы обеспечить достаточное время для перемещения поверхности расплава в глубь образца.

В зависимости от вида обработки и свойств материала надо использовать излучение с вполне определенными энергетическими и временными характеристиками. Если, например, для сварки подходят относительно менее интенсивные, и в то же время более длительные импульсы (длительностью 10^{-2}—10^{-3} с), то для пробивания отверстий, где важно интенсивное испарение материала, подходят более интенсивные и более короткие импульсы (10^{-4}—10^{-6} с).

Чем замечательны лазерные сверла? На циферблате ручных часов «Полет» имеется надпись «23 камня». Подобные

упоминания о числе камней можно видеть и на циферблатах других механически заводящихся часов. Что это за камни? Речь идет о рубиновых камнях, используемых в часовом механизме в качестве подшипников скольжения. При изготовлении таких подшипников требуется высверлить в рубине (материале весьма твердом и в то же время хрупком) отверстия строго цилиндрической формы диаметром всего 0,1—0,05 мм. Многие годы эта операция выполнялась механическим способом с использованием сверл, изготовленных из тонкой рояльной проволоки диаметром 40—50 мкм. Такое сверло делало в минуту до 30 000 оборотов и одновременно совершало при этом около 100 возвратно-поступательных перемещений. Для сверления одного камня требовалось до 10—15 мин.

Начиная с 1964 г. малопроизводительное механическое сверление отверстий в часовых камнях стало везде заменяться *лазерным сверлением*. Разумеется, термин «лазерное сверление» не следует понимать буквально. Лазерный луч не сверлит отверстие — он его *пробивает* за счет интенсивного испарения материала. В настоящее время лазерная пробивка отверстий в рубиновых часовых камнях является обычным делом. Для этой цели применяются импульсные твердотельные лазеры, например лазеры на стекле с неодимом. Отверстие в камне (при толщине заготовки 0,5—1 мм) пробивается серией из нескольких лазерных импульсов, имеющих энергию 0,1—0,5 Дж и длительность порядка 10^{-4} с. Производительность работы лазерной установки в автоматическом режиме — камень в секунду. Это примерно в тысячу раз выше производительности механического сверления!

Чтобы получить тонкую и тончайшую проволоку из меди, бронзы, вольфрама и других металлов, применяют технологию протягивания (волочения) проволоки сквозь отверстия очень малого диаметра. Эти отверстия (каналы волочения) высверливают в материалах, обладающих особо высокой твердостью, например в сверхтвердых сплавах. Наиболее тверд, как известно, алмаз. Поэтому лучше всего протягивать тонкую проволоку сквозь отверстие в алмазе (сквозь так называемые алмазные фильеры). Только алмазные фильеры позволяют получать проволоку диаметром всего 10 мкм. Но как просверлить тонкое отверстие в таком сверхтвердом материале, каким является алмаз? Механически это сделать довольно трудно. Для сверления одного отверстия в алмазной фильере требуется до 10 часов. Зато совсем нетрудно пробить это отверстие серией из несколь-

ких мощных лазерных импульсов. Как и пробивание отверстий в часовых камнях, эта операция выполняется при помощи импульсных твердотельных лазеров.

Канал волочения в алмазной фильере имеет непростой профиль. Он показан на рис. 12, *а*. Лазерными импульсами пробивают черновой канал в алмазной заготовке. Затем, обрабатывая канал ультразвуком, шлифуя и полируя, придают ему необходимый профиль.

Лазерное сверление широко применяют для получения отверстий не только в твердых и сверхтвердых материалах, но и в материалах, отличающихся повышенной хрупкостью.

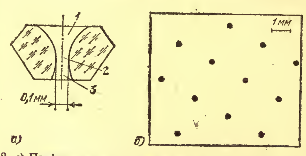


Рис. 12. *а*) Профиль канала волочения в алмазной фильере: *1* — входное отверстие, *2* — рабочая часть канала, *3* — выходное отверстие. *б*) Отверстия, пробитые лазерным излучением в пластине глиноземной керамики.

В качестве примера укажем на подложки микросхем, изготавливаемые из глиноземной керамики. Из-за высокой хрупкости керамики механическое сверление отверстий в ней выполняют, как правило, на «сыром» материале. Обжигают керамику уже после сверления. При этом происходит некоторая деформация изделия, искажается взаимное расположение высверленных отверстий. При использовании «лазерных сверл» можно спокойно работать с керамическими подложками, которые уже прошли обжиг; поэтому указанная выше проблема здесь не возникает. С помощью лазеров пробивают очень тонкие отверстия в керамике — диаметром всего 10 мкм. Механическим сверлением такие отверстия получить попросту нельзя. Для лазерной пробивки отверстий в керамических подложках применяют импульсные CO_2-лазеры (при диаметре отверстия порядка 0,1 мм и больше) и импульсные лазеры на рубине или гранате с неодимом (для отверстий меньшего диаметра). На рис. 12, *б* показаны с шестикратным увеличением от-

верстия диаметром 0,3 мм, пробитые в пластине глиноземной керамики толщиной 0,7 мм с помощью CO_2-лазера.

Приведенные примеры наглядно демонстрируют преимущества лазерного сверления. Это прежде всего возможность получения отверстий в очень твердых или очень хрупких материалах, а также возможность получения очень тонких отверстий (диаметром до 10 мкм). Отношение глубины пробиваемых лазером тонких отверстий к их диаметру достигает рекордно больших значений (по сравнению с другими методами сверления); глубина отверстия может превышать его диаметр в 10—50 раз. Во всех случаях лазерное сверление отличается высокой производительностью. Наконец, в отличие от обычных сверл «лазерные сверла» не ломаются и не изнашиваются.

Можно ли производить сварку через стеклянную перегородку? Предположим, что внутри электронно-лучевой трубки произошла авария — перегорел или оборвался какой-то провод, нарушился контакт. Трубка вышла из строя. Казалось бы, беда непоправима — ведь поломка произошла в вакууме, внутри стеклянного баллона, и никакому сварщику туда не проникнуть. Однако в него может проникнуть лазерный луч. Направляя луч в нужную точку сквозь стекло вакуумного баллона и должным образом фокусируя, можно осуществить необходимый сварочный ремонт.

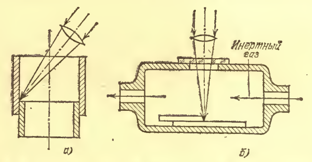


Рис. 13. *а*) Лазерная сварка в труднодоступном месте. *б*) Лазерная сварка в камере, заполненной инертным газом.

Здесь обнаруживается одна из уникальных особенностей лазерного луча — возможность производить сварку через прозрачную для света перегородку, в вакуумированном объеме и вообще в различных труднодоступных местах. Лазерную сварку через прозрачную перегородку применяют не только для восстановительного ремонта электровакуумных

приборов. Большой практический интерес представляет сваривание тех или иных элементов микроэлектроники в камере, заполненной инертным газом. В этом случае предотвращаются реакции окисления. Рис. 13 схематически поясняет, каким образом осуществляют лазерную сварку в труднодоступном месте (*а*) или в камере, заполненной инертным газом (*б*).

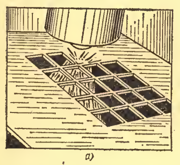
Как используются лазеры при изготовлении микросхем? Развитие микроэлектроники органически связано с совершенствованием технологии изготовления микросхем. Большую помощь может оказать здесь (и оказывает) лазерный луч.

Вначале лазеры применяли лишь для микросварки. Так, при помощи рубинового лазера приваривались вводы к контактам на кремниевых пластинках, приваривались тонкие провода к тонким пленкам. Затем начали применять CO_2-лазеры для пробивания отверстий в керамических подложках для микросхем (о чем мы уже рассказывали).

В настоящее время лазерный луч все чаще используют для подгонки параметров тонкопленочных схем и для изготовления отдельных элементов схемы. С помощью лазера можно целиком изготовить пленочную схему — со всеми входящими в нее резисторами, конденсаторами, индуктивностями. Применяя луч лазера, можно изготовить фотошаблон, предназначающийся для травления микросхем, или шаблон для напыления компонентов микросхемы на подложку. Во всех этих случаях используется эффект испарения материала под действием мощного лазерного излучения.

Предположим, что на диэлектрическую подложку микросхемы нанесена напылением тонкая металлическая пленка. Перемещая вдоль поверхности пленки сфокусированное на нее лазерное пятно, можно испарить определенные участки пленки и тем самым создать нужный «рисунок» микросхемы. В качестве примера приведем конкретную лазерную установку на основе непрерывно накачиваемого лазера на гранате с неодимом. Лазер генерировал регулярную последовательность световых импульсов с частотой 400 имп/с. Длительность отдельного импульса 10^{-7} с, мощность в максимуме 1 кВт. Лазерный луч фокусировали в пятно диаметром 10 мкм. При перемещении пучка происходило испарение узкой полосы металлической пленки; скорость перемещения лазерного пучка составляла 2 мм/с. Полосы на поверхности подложки оказывались практически полностью очищенными от металла.

Что можно резать лазерным лучом? Лазерным лучом можно резать практически любой материал: ткань, бумагу, дерево, фанеру, резину, пластмассу, керамику, листовой асбест, стекло, листы металла. При этом можно получать аккуратные разрезы по сложным профилям. При лазерной резке возгорающихся материалов можно обдувать место разреза струей инертного газа; в этом случае получается гладкий, необожженный край среза. В качестве примера на рис. 14, *а* показан процесс вырезания квадратных отверстий в листе нержавеющей стали толщиной 0,5 мм с помощью CO_2-лазера. На рис. 14, *б* приведен выполненный лазерным лучом разрез слюдяного листа толщиной 3 мм; разрез выполнен по достаточно сложному профилю.



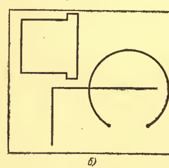


Рис. 14. *а*) Процесс вырезания квадратных отверстий в листе нержавеющей стали с помощью CO_2-лазера. *б*) Разрез листа слюды лазерным лучом.

Для резки используются непрерывно генерирующие лазеры либо лазеры, генерирующие последовательность световых импульсов с высокой частотой следования. Требуемая мощность излучения зависит от разрезаемого материала и толщины заготовки. Например, для резки досок толщиной 50 мм применялся CO_2-лазер мощностью 200 Вт; ширина разреза составляла 0,7 мм. Для резки листов фанеры толщиной 25 мм применялся CO_2-лазер мощностью 8 кВт; скорость резания 1,5 м/мин. Резка стекла при толщине 10 мм требует более высокой мощности излучения — до 20 кВт.

Лазерная резка металлов может производиться излучением мощностью всего 100—500 Вт, если при этом обдувать разрезаемый материал струей кислорода. В этом случае используют термин «газолазерная резка». Схема резака для такой резки показана на рис. 15. Значительная часть энергии, затрачиваемой на процесс резания, получается здесь за счет экзотермических реакций, в которые всту-

пают металл и кислород; иначе говоря, за счет теплоты, которая выделяется при горении металла в струе кислорода. Кроме того, струя кислорода сдувает и уносит из зоны резания расплав и продукты сгорания металла, а также охлаждает участки металла, прилегающие к зоне резания. Использование струи кислорода при лазерной резке не только снижает требования к мощности лазера, но одновременно увеличивает глубину и скорость резания, позволяет получать качественную кромку.

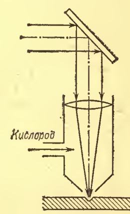


Рис. 15. Газолазерная резка.

Чтобы продемонстрировать, насколько широко используется сегодня лазерная резка, приведем два практических примера, имеющих отношение к совершенно разным областям народного хозяйства. Первый пример — лазерная резка и раскрой тканей на современной ткацкой фабрике. Устройство включает в себя непрерывно генерирующий CO_2-лазер мощностью 100 Вт, систему фокусировки и перемещения лазерного луча, ЭВМ и систему для натяжения и перемещения ткани. В процессе резания лазерный луч перемещается по поверхности ткани со скоростью до 1 м/с. Диаметр сфокусированного светового пятна равен 0,2 мм. Перемещениями лазерного луча и ткани управляет ЭВМ. Подобное устройство позволяет, например, в течение часа раскроить материал для 50 костюмов. Раскрой производится не только быстро, но и с очень высокой точностью. При этом обеспечивается хорошее качество краев разреза.

Другой пример — применение лазерной резки в авиационной промышленности и, в частности, при производстве космических летательных аппаратов. С помощью лазеров осуществляют автоматизированное разрезание листов титана, стали, алюминия. Непрерывно генерирующий CO_2-лазер мощностью 3 кВт разрезает лист титана со скоростью 3,5 м/мин при толщине листа 5 мм и со скоростью 0,5 м/мин при толщине 50 мм. Используя кислородную струю (в методе газолазерной резки), можно получить примерно тот же результат при существенно меньшей мощности лазера: 100—300 Вт.

Что представляет собой современная лазерная технология? Ранее мы познакомились с некоторыми применениями лазерного излучения, имеющими уникальный характер: пробивка тонких отверстий в твердых и хрупких материалах, микросварка миниатюрных деталей, сварка через прозрачную преграду и в труднодоступных местах. Естественно, что в подобных случаях у лазерного луча фактически нет конкурентов. Однако и в обычных ситуациях, где пока еще господствуют традиционные технологии обработки материалов, лазерный луч начинает завоевывать прочные позиции. Так что уже сегодня можно говорить о возникновении и развитии *лазерной технологии*.

«История техники,— пишет академик Н. Г. Басов,— свидетельствует о том, что массовое внедрение новых технологических процессов всегда оказывало революционизирующее воздействие на промышленность. Так было при появлении методов скоростного резания, холодной штамповки, точного литья, электродуговой сварки — перечень примеров легко продолжить. В настоящее время промышленная технология во всем мире, по-видимому, находится в преддверии нового качественного скачка, обусловленного широким внедрением лазеров».

От многих новых и новейших промышленных технологий лазерная технология выгодно отличается двумя качествами. Во-первых, она необычайно многогранна, охватывает самые разнообразные процессы обработки материалов. Во-вторых, она исключительно перспективна. Мы являемся свидетелями пока еще только первых шагов лазерной технологии. Но шаги эти весьма впечатляющи, это шаги ребенка, которому суждено стать гигантом.

Современная лазерная технология включает в себя резку материалов, пробивание отверстий, сварку, различные виды термообработки, скрайбирование, маркировку и ряд других процессов обработки материалов. Впечатляет исключительное *разнообразие* не только процессов обработки, но и обрабатываемых материалов. Лазерным лучом можно обрабатывать практически любой материал.

О лазерной резке и лазерном сверлении мы рассказывали достаточно подробно. Поэтому перейдем сразу к другим процессам лазерной обработки.

Лазерная сварка. Развитие лазерной сварки прошло через два этапа. Вначале развивалась *точечная сварка* — на основе импульсных твердотельных лазеров на рубине и на стекле с неодимом. С появлением мощных CO_2-лазеров и лазеров на гранате с неодимом, дающих непре-

рывное излучение или последовательность часто повторяющихся импульсов, стала развиваться *шовная сварка* с глубиной проплавления до нескольких миллиметров (и даже сантиметров). Примеры точечной лазерной сварки: соединение никелевого контакта с клеммой из никелевого сплава на основании транзистора, приваривание тонких медных проводов друг к другу или к клеммам, взаимное соединение микроэлектронных компонентов. Шовная лазерная сварка с использованием непрерывного излучения мощностью порядка 100 Вт применяется для герметизации корпусов приборов, приваривания наконечников к лопастям газовых турбин, приварки режущих кромок из закаленной стали к полотнам металлорежущих пил и т. д. Скорость сварки достигает нескольких метров в минуту; ширина шва 0,5 мм.

В настоящее время начинает применяться шовная сварка излучением мощностью 1—10 кВт. При этом прочность сварных соединений (ширина шва составляет несколько миллиметров) достигает уровня прочности свариваемого материала. Осуществляется автоматическая лазерная сварка кузовов автомобилей, сварка листов титана и алюминия на судостроительных верфях, сварка газопроводов. На Автозаводе имени И. А. Лихачева в Москве при помощи CO_2-лазера мощностью 5 кВт производят автоматическую лазерную сварку карданных валов автомобилей. Срок службы валов повысился в три раза. Развивается также лазерная сварка неметаллических материалов. Для сварки деталей из обычного стекла используются лазеры мощностью 100 Вт, для сварки кварца — мощностью 300 Вт.

Лазерная сварка успешно конкурирует с хорошо известными способами сварки — электродуговой, сопротивлением, при помощи электронного пучка. Она обладает рядом преимуществ, которые делают ее во многих случаях предпочтительной или даже единственно возможной. О некоторых уникальных особенностях лазерной сварки мы уже говорили. Дополнительно заметим, что при лазерной сварке нет контакта со свариваемым образцом, а поэтому нет опасности его загрязнения какими-либо примесями. В отличие от электронной сварки, для которой нужен вакуум, лазерная сварка производится в атмосфере. Лазерная сварка позволяет осуществлять быстро и с высокой точностью локальное проплавление в данной точке или вдоль заданной линии. Подвергающаяся тепловому воздействию зона имеет очень малые размеры, что важно, в частности, в тех случаях, когда сварка производится в непосредственной близости от чувствительных к нагреву элементов.

Интересно сопоставить данные, относящиеся к электродуговой и лазерной сварке одного погонного метра стали толщиной 20 мм (эти данные получены в Лаборатории лазерной обработки Автозавода имени И. А. Лихачева совместно с МГУ и Институтом атомной энергии имени И. В. Курчатова). Скорость электродуговой сварки 15 м/ч, тогда как лазерная сварка характеризуется скоростью порядка 100 м/ч. При этом для получения прочного шва при электродуговой сварке необходимо выполнить от 5 до 8 проходов, а при лазерной сварке достаточно всего одного прохода. Ширина шва при электродуговой сварке 20 мм. Лазерная сварка дает более аккуратный шов — шириной всего 5 мм.

Термообработка. Когда лазерный луч падает на поверхность металла, быстро нагревается тонкий приповерхностный слой в том месте, куда направлен луч. По мере перемещения луча на другие участки поверхности происходит быстрое остывание нагретого участка. Это используют для закалки поверхностных слоев, приводящей к существенному повышению их прочности. *Лазерная закалка* позволяет избирательно увеличивать прочность именно тех участков поверхности, именно тех деталей, которые в наибольшей мере подвергаются износу. Так, лазерную закалку применяют в автомобильной промышленности — для упрочнения головок цилиндров двигателей, направляющих клапанов, шестерен, распределительных валов и т. д. На Московском автозаводе имени Ленинского комсомола производится поверхностная закалка корпуса заднего моста автомобиля «Москвич» при помощи CO_2-лазера.

Для повышения твердости поверхности применяют также *лазерное легирование*. Легирующие присадки в виде порошка предварительно наносят на обрабатываемую поверхность. При облучении лазером происходит плавление и взаимное перемешивание порошка и материала детали в пределах тонкого приповерхностного слоя.

Термообработку обычно производят непрерывно генерирующим CO_2-лазером мощностью порядка 1 кВт.

В последние годы появились новые лазерные технологические процессы, относящиеся к термообработке. Один из таких процессов — *лазерное остекловывание металлов*. Если очень быстро охладить нагретую лазерным лучом поверхность металла, то возникнет тонкий приповерхностный аморфный (стеклообразный) слой, отличающийся высокой прочностью и коррозионной стойкостью. Охлаждение поверхности металла должно происходить со скоростью 10^8 градусов в секунду. Другой пример — *поверхностное упроч-*

нение металлов ударными волнами при использовании лазеров, генерирующих последовательности импульсов. При интенсивности излучения 10^9—10^{10} Вт/см^2 у поверхности металла образуется слой плазмы. Плазма распространяется навстречу лазерному лучу; в результате рождается ударная волна. Поскольку луч представляет собой последовательность импульсов, возникает последовательность ударных волн. Пиковые давления на поверхность достигают сотен атмосфер. Воздействие на металлическую деталь оказывается в данном случае таким же, как при холодной обработке металла давлением.

Другие процессы обработки. При обработке хрупких материалов (керамики, стекла, кремния) широко применяют *скрайбирование* — нанесение на поверхности материала канавки или пробивка ряда близко расположенных отверстий, после чего материал легко надламывается и раскалывается вдоль линии скрайбирования. Хорошо известный всем пример скрайбирования — использование алмаза при разрезании оконного стекла. В настоящее время широко развивается лазерное скрайбирование на основе применения CO_2-лазеров, работающих в непрерывном режиме либо режиме повторяющихся импульсов.

Лазеры находят широкое применение при *маркировке* различных промышленных изделий в тех случаях, когда изделия имеют малые размеры или очень хрупки, а также когда требуется высокая скорость маркировки.

Отметим также отличающуюся высокой надежностью *лазерную зачистку проводов* в авиационной промышленности. Здесь используется тот факт, что излучение CO_2-лазера хорошо поглощается органическим материалом (изоляцией провода) и отражается от поверхности металла. Лазер обеспечивает высокую чистоту поверхности и не оказывает вредного воздействия на металл проволоки (не образуются «задиры», не происходит обрыв провода).

Чем интересна и перспективна лазерная технология? На этот вопрос мы фактически уже ответили, когда рассказывали ранее о преимуществах применения лазеров в различных процессах обработки материалов. Нам остается лишь подвести итоги, подчеркнуть главное.

Прежде всего предоставим слово академику Н. Г. Басову. «Лазерный луч,— пишет он в статье, посвященной лазерной технологии,— это уникальный тепловой источник, способный нагреть облучаемый участок детали до высоких температур за столь малое время, в течение которого тепло не успевает «растекаться». Нагреваемый участок мо-

жет быть при этом размягчен, рекристаллизован, расплавлен, наконец его можно испарить. Дозируя тепловые нагрузки путем регулировки мощности и продолжительности лазерного облучения, можно обеспечить практически любой температурный режим и реализовать различные виды термообработки. Лазерный нагрев используется для поверхностной закалки и легирования металлов, для плавления при сварке, для плавления и испарения с выбросом паров при резке и сверлении».

Итак, попробуем перечислить основные преимущества лазерной обработки материалов. У нас получится следующий перечень:

1) разнообразие возможных процессов обработки и разнообразие обрабатываемых материалов (включая материалы, которые вообще не поддаются механической обработке);

2) высокая скорость выполнения операций по обработке материала;

3) возможность автоматизации операций и, как следствие (с учетом предыдущего пункта), существенное повышение производительности труда;

4) высокое качество обработки (прочность сварных швов, гладкость срезов, отсутствие загрязнений обрабатываемой поверхности);

5) возможность высокоточной прецизионной обработки;

6) селективность (избирательность) воздействия, когда обрабатываются лишь определенные участки поверхности, а соседние участки не подвергаются при этом каким-либо воздействиям;

7) возможность осуществления дистанционной (на расстоянии) обработки материала;

8) возможность выполнения ряда уникальных операций.

Не правда ли, весьма внушительный перечень достоинств?

Однако, говоря о перспективности лазерной технологии, следует обратить внимание не только на достоинства, но и на недостатки этой технологии. Таковые, конечно, имеются. Главными из них являются сравнительно низкий коэффициент полезного действия и все еще недостаточная надежность мощных лазеров, высокая стоимость лазерных установок. Дальнейшее развитие лазерной технологии в значительной степени зависит от того, насколько быстро удастся преодолеть эти недостатки.

Мечты или действительность завтрашнего дня? Юным читателям, для которых пишется эта книга, предстоит жить и трудиться не только в XX, но и в XXI веке. Они будут

свидетелями (а некоторые, возможно, и участниками) процесса широчайшего проникновения лазерной технологии в самые различные отрасли промышленности. Можно не сомневаться, что широкое внедрение лазеров решительным образом изменит весь облик обрабатывающей промышленности. Заняв прочные позиции в *обработке материалов*, лазерная технология распространится и на *производство материалов* — возникнет *лазерная металлургия*.

Попробуем немного пофантазировать, мысленно заглянув в завтрашний день. Не только на обрабатывающих заводах, но буквально везде мы встречаемся с удивительным тружеником — мощным лазерным лучом. Он легко и быстро очищает поверхность зданий от грязи, вытесняя старомодный пескоструйный способ очистки, точно и виртуозно обрабатывает образцы природных камней, разрушает твердые породы, помогая прокладывать тоннели в горах, рыть глубокие шахты.

Может быть, однако, проходка горных пород лазерным лучом выглядит слишком фантастичной? Откроем журнал АН СССР «Квантовая электроника» (1975, вып. 1, с. 37). Там можно прочитать, что кратковременное предварительное облучение горных пород излучением непрерывного CO_2-лазера при интенсивности излучения 10^5 Вт/см^2 может уменьшить прочность пород в 10 раз, что заметно увеличивает скорость проходки скальных участков обычными методами механического разрушения. Журнал сообщает, что CO_2-лазер мощностью 200 Вт способен практически мгновенно раскалывать образцы горного хрусталя объемом 100 см^3. При действии луча на более крупные образцы наблюдается интенсивное выкалывание пластинок, выбрасываемых в сторону на несколько метров. Этот эффект объясняется быстрым тепловым расширением участков хрусталя, нагретых лучом лазера.

Эксперименты с мощным CO_2-лазером, выполненные в Институте атомной энергии имени И. В. Курчатова, показали, что энергоемкость разрушения образцов кварцита, альбинита, гранита, мрамора составляет 100 Дж/см^3. Современные зарубежные непрерывно генерирующие лазеры имеют мощность до 100 кВт. Конечно, это не предел. Кто знает, какими будут сверхмощные лазеры завтрашнего дня? Вполне возможно, что эти лазеры сделают реальной высокопроизводительную проходку горных пород световым лучом.

С п р а в к а. Примеры отечественных лазерных установок для обработки материалов. Первые отечественные технологические установки были созданы в 1964 г. Это были установки типа СУ-1 и К-3. В течение

ряда лет они эксплуатировались в производственных условиях, выполняя операции сверления отверстий, сварки, подгонки номиналов сопротивления. Позднее появились более совершенные установки К-3М, «Квант-3», УЛ-20М и др., которые не только успешно эксплуатировались в промышленности, но и экспонировались на международных выставках. В настоящее время отечественная промышленность освоила выпуск многих типов усовершенствованных лазерных установок, предназначенных для выполнения самых различных операций по обработке материалов. Некоторые типы лазерных установок описаны ниже.

«Квант-9». Для сверления отверстий практически в любых материалах и прежде всего для сверления черновых отверстий в алмазных фильерах. Используется импульсный лазер на стекле с неодимом, генерирующий импульсы с энергией до 10 Дж; длительность импульса 0,2—0,8 мс. Предусмотрено автоматическое управление (в режиме один лазерный импульс в секунду). Потребляемая мощность 2 кВт. Габаритные размеры 115×70×120 см, масса 200 кг.

«Кристалл-6». Для сверления и фрезерования металлов и неметаллов (феррита, керамики, ситалла, рубина и др.). Диаметр отверстий 0,1—0,6 мм, глубина до 3 мм. Ширина обрабатываемого паза 0,05—0,2 мм; точность обработки 3—4-го класса. Используется импульсный лазер на стекле с неодимом. Энергия импульса от 0,5 до 4 Дж, частота следования импульсов от 0,5 до 20 Гц. Потребляемая мощность 4,5 кВт. Габаритные размеры 125×95×130 см.

«Квант-12». Для шовной сварки с высокой локальностью нагрева. Качество сварного соединения контролируется в процессе сварки при помощи специальной оптической системы. Скорость сварки не ниже 15 см/мин, глубина проплавления до 0,3 мм. Используется лазер на гранате с неодимом, генерирующий регулярную последовательность импульсов с частотой следования до 20 Гц. Энергия импульса около 5 Дж, длительность 1—4 мс. Потребляемая мощность 6 кВт. Габаритные размеры сварочного станка 100×95×123 см, масса 250 кг.

«Квант-15». Для сварки, газолазерной резки, термообработки и пробивания отверстий. Используется лазер на гранате с неодимом, генерирующий последовательность импульсов с частотой следования до 20 Гц. Энергия импульса до 15 Дж, средняя мощность излучения не ниже 100 Вт. Длительность импульса 1,5—4 мс. Максимальная толщина разреза по черным металлам до 5 мм; скорость резки до 35 см/мин. Глубина проплавления при сварке черных металлов 1 мм; скорость сварки до 35 см/мин. Максимальная глубина отверстий до 10 мм. Потребляемая мощность не выше 12 кВт. Габаритные размеры 100×96×120 см, масса 200 кг.

«Квант-20». Для резки листов термически полированного стекла на заготовки в производстве изделий электронной техники. Используется лазер на гранате с неодимом мощностью 60 Вт в непрерывном режиме. Скорость резки до 36 см/мин. Размеры исходных листов стекла от 10×5×0,1 см до 65×50×0,3 см. Потребляемая мощность 10 кВт. Габаритные размеры 145×85×140 см, масса 400 кг.

«Квант-50». Для пайки навесных элементов на печатные платы, резки диэлектрических и металлических материалов, сварки и термоупрочения металлических деталей. Предусмотрена возможность использования устройств с программным управлением. Применяется лазер на гранате с неодимом в режиме непрерывной генерации; мощность излучения регулируется в пределах от нуля до 125 Вт. Потребляемая мощность не выше 15 кВт. Габаритные размеры 155×144×127 см, масса 470 кг.

ЛАЗЕРЫ В МЕДИЦИНЕ

Какие скальпели применяются в хирургии? Обезболивание операции, борьба с кровотечением, предупреждение инфекции — эти три сопутствующие проблемы всегда волновали хирургов. Больному в средние века угрожала опасность умереть во время операции от болевого шока. Если он и переносил боль, то мог умереть от большой потери крови. В дальнейшем ему еще предстояло победить инфекцию, развивавшуюся в ране. Чтобы ослабить болевые ощущения, хирурги прошлых веков старались делать операцию побыстрее. Для этого, прежде всего, нужен был очень острый скальпель. Было подмечено, что прикосновение к ране раскаленным предметом останавливает кровотечение, к тому же рана в таких случаях, как правило, не нагнаивается. Поэтому врачи стали оперировать специально нагретыми и даже раскаленными хирургическими ножами. Позднее для остановки кровотечения стали перевязывать ниткой кровеносные сосуды и применять специальные зажимы. Одновременно с совершенствованием техники хирургической операции совершенствовался и скальпель. На смену вычурным средневековым ножам сложной конфигурации (рис. 16, *а*) пришли современные скальпели из нержавеющей стали, имеющие простую форму, определяемую характером той или иной конкретной операции. Некоторые из них показаны на рис. 16, *б*.

Новым этапом в развитии хирургической техники XX века стало появление электрического скальпеля (электроножа), в котором используется ток высокой частоты. Если при применении обычного (механического) скальпеля приходится останавливать кровотечение после каждого разреза, то при применении электроножа этого делать уже не надо. Электрод электроножа одновременно и рассекает биологическую ткань, и «заваривает» (как говорят медики, коагулирует) края разреза. При коагуляции образуется кровяной сгусток, стенки кровеносного сосуда сближаются, кровотечение останавливается. Правда, сосуд не должен быть крупным.

Начиная со второй половины 60-х годов в хирургии в качестве своеобразного скальпеля стал использоваться лазерный луч. Можно сказать, что появился еще один тип скальпеля — *лазерный скальпель.*

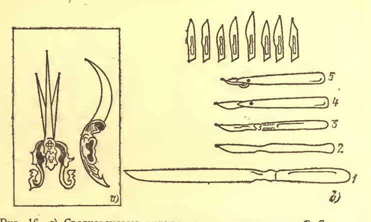


Рис. 16. *а*) Средневековые хирургические инструменты. *б*) Скальпели из нержавеющей стали: *1* — большой ампутационный нож, *2* — брюшистый скальпель, *3* — скальпель со съемным лезвием (вверху показаны лезвия разной формы), *4* — скальпель одноразового использования, *5* — скальпель для микрохирургии.

Что такое лазерный скальпель и чем он интересен? В операционной комнате рядом с операционным столом помещают лазерную установку. Обычно используется CO_2-лазер непрерывного действия мощностью в несколько десятков ватт. Излучение лазера поступает в шарнирный световод — систему полых раздвигающихся трубок, по которой свет распространяется, отражаясь от зеркал. По световоду излучение попадает в оптическую головку, а затем в выходную трубку, из которой и вырывается наружу в виде достаточно интенсивного светового луча. Во время операции хирург держит в руке выходную трубку и может перемещать ее в пространстве, свободно поворачивая в разных направлениях и тем самым посылая лазерный луч в нужное место.

На рис. 17, *а* схематически изображена лазерная медицинская установка «Скальпель-1». Стрелками показан ход световых лучей. На рис. 17, *б* представлен момент операции, выполняемой с применением установки «Скальпель-1». На рис. 17, *в* крупным планом изображен лазерный «скальпель» в руке хирурга. Хорошо видна указка на конце выходной трубки. Она служит для наведения луча, ведь сам

луч невидим. Луч фокусируется в точке, которая находится на расстоянии 3 мм от конца указки.

В фокусе лазерного луча концентрируется энергия, достаточная для того, чтобы быстро нагреть и испарить биологическую ткань. Постепенно перемещая «лазерный

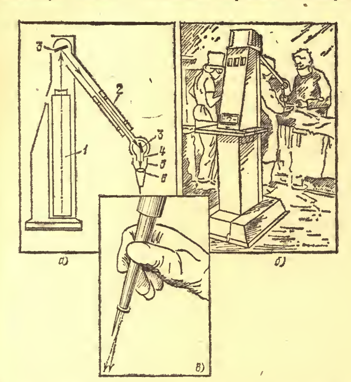


Рис. 17. *а*) Лазерная установка «Скальпель-1»: *1* — CO_2-лазер непрерывного действия (мощность излучения до 20 Вт), *2* — шарнирный световод, *3* — зеркала, *4* — оптическая головка, *5* — выходная трубка, *6* — фокусирующая линза; стрелками показан ход световых лучей, *б*) Момент операции. *в*) Лазерный «скальпель» в руке хирурга.

скальпель», хирург рассекает ткань. Глубина разреза зависит от скорости резания и от степени кровенаполнения ткани. В среднем она равна 2—3 мм. Часто рассечение тканей выполняют не в один, а в несколько приемов, рассекая как бы послойно.

В качестве хирургического скальпеля лазерный луч обладает целым рядом достоинств. Во-первых, он производит

относительно бескровный разрез, так как одновременно с рассечением тканей коагулирует края раны, «заваривая» не слишком крупные кровеносные сосуды. В этом отношении лазерный скальпель сходен с электроножом.

Во-вторых, лазерный скальпель отличается постоянством режущих свойств, надежностью в работе. Если случайное попадание на твердый предмет, например кость, может вывести механический скальпель из строя, то для лазерного скальпеля такой опасности нет. Лазерным лучом можно даже разрушать камни в почках и желчных протоках.

В-третьих, лазерный луч в силу своей прозрачности позволяет хирургу хорошо видеть оперируемый участок. Лезвие же обычного скальпеля, равно как и электрод электроножа, всегда в какой-то степени загораживают от хирурга рабочее поле.

В-четвертых, лазерный луч рассекает ткань на расстоянии, не оказывая на нее какого-либо механического давления. В отличие от операции обычным скальпелем или электроножом, хирург в данном случае может не придерживать ткань рукой или инструментом.

В-пятых, лазерный скальпель обеспечивает абсолютную стерильность. Ведь с тканью взаимодействует здесь только излучение. К тому же в области рассечения ткани возникает высокая температура.

В-шестых, луч лазера действует локально, испарение ткани происходит только в точке фокуса. Прилегающие участки ткани повреждаются при этом значительно меньше, чем при применении электроножа и даже механического скальпеля.

В-седьмых, как показала клиническая практика, в отличие от обычных ран рана от лазерного скальпеля почти не болит и относительно быстро заживляется.

Какие хирургические операции выполняют при помощи лазерного луча? Практическое использование лазеров в хирургии началось в СССР в 1966 г. в Институте хирургии имени А. В. Вишневского (под руководством академика А. А. Вишневского). Лазерный скальпель был применен в операциях на внутренних органах грудной и брюшной полостей. В настоящее время лазерным лучом делают кожно-пластические операции, оперируют пищевод, желудок, кишечник, почки, печень, селезенку и другие внутренние органы. Делаются первые шаги по оперированию сердца. Очень заманчиво использовать лазерный скальпель в операциях на органах, где особенно много кровеносных сосудов, например, на печени, селезенке, сердце.

Возьмем интересную монографию «Лазеры в клинической медицине». Ее выпустило в свет издательство «Медицина» в 1981 г. Это труд большого коллектива советских ученых. На с. 150 мы находим лаконичное описание результатов операций, выполненных в 1970 г. под руководством профессора С. Д. Плетнева. Приведем это описание в качестве одного из конкретных примеров, показывающих, что применение лазерного скальпеля в медицинской практике становится обычным делом. Итак, читаем: «С помощью CO_2-лазера выполнили 13 различных вмешательств на желудке и кишечнике (разрез, резекция). Для разрезов тонкой и толстой кишки при выходной мощности лазера 9—11 Вт достаточно было провести лучом один раз, реже два раза (для толстой кишки), а для желудка два-три раза. Стенка кишки лучом лазера рассекалась легко, края разреза были ровными и сухими, покрыты пленкой коричневого цвета. Кровотечения из стенок кишки ни разу не отмечалось. Стенка желудка также легко рассекалась лучом лазера. Никаких осложнений, связанных с применением лазера, не наблюдалось. Заживление разрезов стенки желудка и кишечника заканчивалось к 25—30-м суткам с образованием ровных, белесоватых рубцов, мало отличимых от окружающих тканей».

Лазерный скальпель используют не только для *рассечения* тканей, но также и для их *сшивания* (для биологической сварки).

Рассечение производят сфокусированным лучом. При мощности излучения 20 Вт и диаметре сфокусированного лазерного пятна 1 мм достигается интенсивность 2,5 кВт/см^2. Излучение проникает в ткань примерно на глубину 50 мкм. Следовательно, объемная плотность мощности излучения, идущая на нагрев ткани, достигает 500 кВт/см^3. Для биологических тканей это огромная величина. Естественно, происходят быстрое разогревание и испарение ткани — налицо эффект рассечения ткани лазерным лучом. Если же лазерный луч расфокусировать и тем самым снизить интенсивность до 25 Вт/см^2, т. е. уменьшить ее по сравнению с предыдущим случаем в сто раз, то ткань испаряться не будет, а будет происходить поверхностная коагуляция («заваривание»). Вот этот-то процесс и используют для сшивания разрезанной ткани. Биологическая сварка осуществляется за счет коагуляции жидкости, содержащейся в рассекаемых стенках оперируемого органа и специально выдавливаемой в промежуток между соединяемыми участками ткани.

Операции на сердце по праву относят к числу наиболее сложных и ответственных. Приведем один конкретный пример того, как можно использовать в таких операциях лазерный скальпель. Створки клапана сердца похожи на два лепестка. Одним краем лепестки прикреплены к внутренней стенке сердца. Свободными краями они в соответствующие циклы работы сердца или плотно смыкаются друг с другом, полностью закрывая отверстие, или расходятся, открывая отверстие и пропуская кровь только в одном направлении. При некоторых заболеваниях сердца свободные края «лепестков» частично срастаются, отчего сужается отверстие, пропускающее кровь. Требуется хирургически разделить створки сердечного клапана и притом строго по линии их сращения (как говорят медики, по комиссуре). Вот для этой-то операции и удобно воспользоваться лазерным скальпелем. На рис. 18 схематически изображена операция разделения клапанов сердца по комиссуре лучом лазера. Луч показан штриховой прямой.

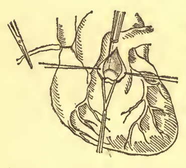


Рис. 18. Операция разделения клапанов сердца по комиссуре.

В установке «Скальпель-1» и многих подобных ей световая энергия передается от лазера к оперируемому органу по системе жестких полых трубок. Вместо системы трубок можно использовать *гибкие световоды* из диэлектрических волокон. Обычно волокна компонуют в жгут. Диаметр поперечного сечения жгута порядка 1 мм, диаметр отдельного волокна в жгуте порядка 10—100 мкм. Используя гибкий световод, хирург может значительно свободнее манипулировать лазерным скальпелем. Главное же, передача значительной световой мощности по тонкому волоконному жгуту делает возможным выполнение хирургических операций принципиально нового типа. Обычно при операции, например на желудке, необходимо предварительно сделать вскрытие брюшной полости. Используя же тонкий волоконный жгут, можно (при некоторых заболеваниях желудка) обойтись без вскрытия полости, а просто ввести гибкий и тонкий «лазерный скальпель» через рот и пищевод внутрь желудка и производить операцию на желудке, так сказать, изнутри. Подобная техника операций уже применяется на

практике. Так, например, ее с успехом применяют для остановки (посредством коагуляции) кровотечений из язв в пищеварительном тракте. При этом используется излучение газоразрядного лазера на аргоне. Он генерирует в зелено-голубой области спектра; длина волны излучения 0,5 мкм.

Какое применение находят лазеры в офтальмологии? Краткий ответ таков: исключительно большое. Надо сказать, что офтальмология (область медицины, имеющая дело с глазными заболеваниями) исторически явилась первой областью клинической медицины, в которой лазеры получили наиболее широкое применение. В настоящее время интенсивно развивается новое направление в медицине — *лазерная микрохирургия глаза.* Исследования в этом направлении ведутся в Одесском институте глазных болезней имени В. П. Филатова, в Московском НИИ глазных болезней имени Г. Л. Ф. Гельмгольца, в Московском НИИ микрохирургии глаза и во многих других «глазных центрах» СССР.

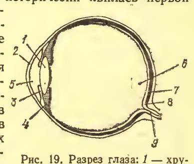


Рис. 19. Разрез глаза: *1* — хрусталик (созданная природой двояковыпуклая линза), *2* — роговица, *3* — радужная оболочка с отверстием (зрачком) в центре, *4* — кольцевая мышца, охватывающая хрусталик, *5* — внутриглазная жидкость, *6* — стекловидное тело, *7* — сосудистая оболочка, состоящая из питающих глаз кровеносных сосудов, *8* — сетчатка (светочувствительный слой), *9* — зрительный нерв.

Напомним, что представляет собой человеческий глаз. Разрез глаза схематически показан на рис. 19.

Из наиболее серьезных глазных заболеваний, которые могут привести к слепоте, выделим пять. Это глаукома, катаракта, отслоение сетчатки, диабетическая ретинопатия, злокачественная опухоль сосудистой оболочки. Что такое глаукома? Чтобы ответить на этот вопрос, вспомним, что пространство между роговицей и хрусталиком заполняет внутриглазная жидкость (см. рис. 19). Ее производит маленькая железа, находящаяся у края радужной оболочки. Жидкость омывает переднюю часть хрусталика и затем выводится из глаза через своеобразную дренажную систему радужной оболочки. Внутриглазная жидкость непрерывно производится железой и непрерывно выводится из глаза через радужную оболочку. Если дренажная система радужной оболочки нарушается, происходит задержка и накоп-

ление внутриглазной жидкости в глазу, возрастает ее давление, появляются острые боли, развивается глаукома. Заболевание сопровождается сначала ухудшением зрения (очертания предметов становятся туманными, возникают радужные ореолы), а затем приводит к слепоте. Другое серьезное глазное заболевание — катаракта. Оно проявляется в помутнении и даже полной непрозрачности хрусталика вследствие нарушения питания тканей, глазных травм и других причин. При травмах глаза может происходить отслоение сетчатки — отделение сетчатой оболочки от сосудистой оболочки, устилающей глазное дно. При этом сужается поле зрения, снижается острота зрения, может наступить слепота. Диабетическая ретинопатия — поражение сетчатки (по латыни «ретины») глаза, а также сосудистой оболочки в связи с сосудистыми и обменными нарушениями, возникающими у больных сахарным диабетом.

Первые применения лазеров в офтальмологии были связаны с лечением отслоения сетчатки. Внутрь глаза через зрачок посылаются световые импульсы от рубинового лазера (энергия импульса 0,01—0,1 Дж, длительность порядка 0,1 с). Они свободно проходят сквозь прозрачное стекловидное тело и поглощаются сетчаткой. Фокусируя излучение на отслоившиеся участки сетчатки, производят «приваривание» сетчатки к глазному дну за счет коагуляции. Операция проходит быстро и совершенно безболезненно. Больной просто «не успевает» почувствовать боли.

Наибольшее число случаев потери зрения связано с глаукомой. Это заболевание поражает 2—3% людей в возрасте старше 40 лет. Традиционные хирургические методы лечения глаукомы крайне сложны, сильно травмируют глаз и к тому же ненадежны. Представляется естественным воспользоваться в данном случае лазерным лучом — «прожечь» отверстия (протоки) в радужной оболочке и тем самым восстановить ее дренажные свойства, создать нормальный отток внутриглазной жидкости. Очень скоро, однако, выяснилось, что прожигание радужной оболочки вызывает воспаление, которое довольно быстро ликвидирует сделанные протоки. Исследования советских медиков во главе с академиком М. М. Красновым показали, что надо не прожигать, а *пробивать* протоки в радужной оболочке. Иначе говоря, лазерные импульсы должны оказывать на оболочку не тепловое, а механическое воздействие (за счет образования ударной волны). Для этого нужно, чтобы лазерный импульс был чрезвычайно коротким. В применяемой для лечения глаукомы советской лазерной установке «Ятаган» исполь-

зуются лазерные импульсы длительностью всего 10^{-1} с. Воздействие таких импульсов на глазные ткани дает минимальные коагуляционные и воспалительные эффекты.

Все же поразительно, насколько лазер упростил операцию по излечению глаукомы. Вся операция занимает 10—15 минут, проводится амбулаторно. Больной пришел, посидел перед аппаратом, потом встал и пошел домой.

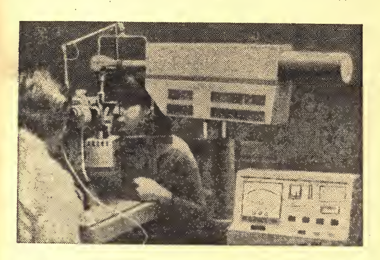


Рис. 20. Момент операции по излечению глаукомы.

На рис. 20 представлен момент такой операции с использованием установки «Ятаган».

В настоящее время лазерная микрохирургия применяется для лечения всех перечисленных ранее глазных заболеваний. При лечении диабетической ретинопатии применяют коагуляцию сетчатки зелено-голубым лучом аргонового лазера. Лазерокоагуляция используется также для лечения катаракты и разрушения внутриглазных опухолей.

Можно ли излечивать лазерным лучом злокачественные опухоли? Да, можно. Лазерное излучение как новое средство лечения рака используется в СССР во многих лечебных заведениях. Исследование возможностей такого лечения ведется в течение вот уже двух десятков лет в Московском научно-исследовательском онкологическом институте имени П. А. Герцена, Институте проблем онкологии АН УССР, Ленинградском институте онкологии имени Н. Н. Петрова и других онкологических центрах.

В онкологических исследованиях и клинической практике используются лазеры разных типов: CO_2-лазер в непрерывном режиме (длина волны 10,6 мкм, мощность до 100 Вт), гелий-неоновый лазер в непрерывном режиме (0,63 мкм, мощность до 30 мВт), гелий-кадмиевый лазер в непрерывном режиме (0,44 мкм, мощность до 40 мВт), импульсный лазер на азоте (0,34 мкм, мощность импульса 1,5 кВт, средняя мощность излучения 10 мВт). Разработаны и применяются три метода воздействия лазерного излучения на опухоли: 1) *лазерное облучение* — облучение опухоли расфокусированным лазерным лучом, приводящее к гибели раковых клеток, к потере способности размножаться; 2) *лазерокоагуляция* — разрушение опухоли умеренно сфокусированным лучом; 3) *лазерная хирургия* — иссечение опухоли вместе с прилегающими тканями сфокусированным лазерным лучом. Удается излечивать рак кожи, слизистых оболочек, различных внутренних органов. Число больных, излеченных лазерным лучом, исчисляется тысячами.

Конечно, механизм воздействия на опухоль лазерного излучения (особенно излучения малой интенсивности) во многих отношениях еще неясен. Многочисленные эксперименты показали, что эффект воздействия на опухоль низкоинтенсивного лазерного луча существенно зависит как от характера опухоли, так и от параметров излучения (длины волны, мощности и т. д.). Одна и та же опухоль различно реагирует на излучение разных лазеров. Так, например, излучение гелий-неонового и азотного лазеров ускоряет, а излучение гелий-кадмиевого лазера тормозит рост опухолей.

Заменит ли лазер бормашину? Говорят, ничего нет более неприятного, чем острая зубная боль. И тем не менее многие откладывают свой визит к стоматологу из-за страха перед бормашиной. Возможно, что недалеко время, когда бормашину заменит практически не причиняющий боли и не производящий угнетающего жужжания лазерный луч. Исследования показали, что лазерное излучение действует на больной зуб избирательно: оно поглощается потемневшими (больными) участками зуба и отражается от здоровых. Иными словами, излучение лазера разрушает пораженную кариесом зубную ткань и не разрушает при этом (в отличие от бормашины) соседних здоровых участков зуба. Возможно, что лазеры будут применяться не только для лечения больных зубов, но и для предупреждения зубных заболеваний. Выяснено, что в результате облучения инфракрасным лучом эмаль зубов делается более стойкой к кариесу. Про-

исходит нечто вроде термообработки, повышающей прочность поверхности зуба.

Но все это в будущем, хотя, возможно, и не слишком далеком. А пока стоматологи используют лазерное излучение для лечения заболеваний слизистой оболочки полости рта. Для этой цели применяют гелий-неоновый лазер (0,63 мкм). Оказалось, что излучение этого лазера останавливает воспалительные и в то же время стимулирует восстановительные процессы. Оно инициирует размножение клеток слизистой оболочки, активизирует в организме больного внутренние защитные механизмы.

Чем объясняется интерес терапевтов к лазерам? Терапевтов прежде всего пленяет не понятое до сего времени, но однако весьма эффективное действие красного излучения гелий-неонового лазера на биологические процессы в организме человека. Только что мы говорили о лечении заболеваний слизистой оболочки полости рта. «Чудесное» действие красного лазерного луча этим далеко не исчерпывается.

Серьезной проблемой для врачей издавна была проблема сращивания костей после переломов. Выяснилось, что излучение гелий-неонового лазера существенно ускоряет процесс сращивания костей. Все лечение в данном случае сводится к десятку-другому сеансов облучения места перелома гелий-неоновым лазером мощностью порядка всего лишь 10 мВт.

Заболевания вен нередко приводят к образованию так называемых трофических язв (преимущественно на голени). Кожа ноги краснеет, зудит, начинает кровоточить. Традиционные терапевтические и хирургические методы лечения таких язв сложны и малоэффективны. И здесь неожиданно пришел на помощь гелий-неоновый лазер. Курс лечения, состоящий из 20—25 десятиминутных сеансов облучения трофической язвы маломощным лазером, заканчивается, как правило, полным ее заживлением. Такой же чудесный эффект наблюдается при облучении гелий-неоновым лазером долго не заживающих травматических и послеожоговых ран.

Отдаленные последствия лазерной терапии при трофических язвах и долго не заживающих ранах проверялись на большом количестве излеченных больных в сроки от двух до семи лет. В течение этих сроков у 97% бывших больных язвы и раны более не открывались и лишь у 3% наблюдались рецидивы заболевания.

Все это позволяет говорить о том, что красный луч гелий-неонового лазера каким-то образом *стимулирует био-*

логические процессы в человеческом организме, чем и достигается излечение. Появился специальный термин «лазерная биостимуляция». Механизм биостимуляции в настоящее время еще не вполне ясен.

Интерес терапевтов к лазерам связан не только с биостимуляцией. Не менее интересным оказалось воздействие излучением маломощного лазера на биологически активные точки поверхности тела человека. Можно говорить о *светоукалывании* — своеобразном варианте известного способа лечения иглоукалыванием. Светоукалыванием лечат различные заболевания, связанные с расстройствами нервной и сосудистой системы, снимают боли при радикулите и головные боли, регулируют кровяное давление.

Что могут дать лазеры медицине завтра? Мы привели далеко не полный, но тем не менее весьма внушительный перечень практических применений лазеров в современной клинической медицине. Сегодня уже трудно представить, как это всего двадцать лет назад врачи обходились без лазеров? Успехи как *лазерной хирургии* (особенно микрохирургии глаза), так и *лазерной терапии* действительно огромны. И все же это только первые шаги, первые прикидки, первые пробы, которые часто делаются наугад.

Предстоят серьезные исследования механизмов действия лазерного излучения на биологические объекты. Конечно, тепловое и ударное воздействия излучения на ткань можно понять, исходя из известных законов физики. Однако этих законов недостаточно, чтобы объяснить различные явления, которые развиваются в живых тканях после облучения, например отек и воспаление. Пока еще мы не знаем, какая именно длина волны лазерного излучения наиболее подходит для тех или иных клинических целей, какой именно режим генерации и какая энергия излучения являются наилучшими в том или ином конкретном случае. Все это предстоит исследовать и понять в ближайшие десятилетия.

Ясно, что подобные исследования значительно повысят эффективность медицинских применений лазеров. Мы сможем намного полнее использовать при лечении больных те преимущества лазерного луча, которые очевидны для нас уже сегодня. Хирурги будут увереннее обращаться с лазерным скальпелем, терапевты будут смелее и чаще назначать лазерное облучение, онкологи будут более обоснованно выбирать наиболее эффективный метод лечения. А это означает, в конечном счете, что лазеры будут применяться в медицинской практике значительно шире;

их начнут использовать *повсеместно*. В каждой клинике появятся специализированные кабинеты, на дверях которых будут, возможно, такие таблички: «Лазерная микрохирургия глаза», «Лазерная операционная», «Светоукалывание», «Кабинет лазерной биостимуляции» и др. Эти кабинеты будут оснащены разнообразными и более совершенными лазерными установками. Без сомнения, лазеры изменят самый характер лечебного процесса. Они сделают его более быстрым, практически безболезненным, бескровным, а главное, более результативным.

Такой представляется нам картина будущей лазерной медицины в общих чертах. При этом можно, конечно, указать и некоторые отдельные задачи, которые, по-видимому, будут решены в этой области в ближайшем будущем.

Начнется широкое применение лазеров для *диагностики* (иначе говоря, для распознавания) различных заболеваний. Уже сегодня с помощью гелий-неонового лазера мощностью 0,1 Вт получают фотоснимки кровеносных сосудов руки. Заметим, что при помощи рентгеновских лучей такие снимки получить нельзя. Возможно, что с помощью лазеров можно будет просвечивать всю систему кровеносных сосудов человека и выявлять различные болезненные изменения в них. Приведем еще один пример из области лазерной диагностики будущего. Известно, что для успешного лечения рака важно раннее обнаружение злокачественных опухолей. Для этой цели можно, в принципе, воспользоваться ультрафиолетовым лазерным лучом. Дело в том, что под действием такого луча некоторые химические соединения, накапливающиеся в больных тканях, начинают светиться. По характеру этого свечения можно определить не только сам факт возникновения и вид опухоли, но и ее размеры и даже примерное время зарождения.

Новый этап в развитии лазерной хирургии начнется в результате широкого внедрения гибких тонких волоконных световодов, позволяющих делать внутриполостные операции без вскрытия. В частности, использование таких световодов позволит, наконец, заменить бормашину лазерным лучом.

Лазерный скальпель будет широко использоваться в операциях практически на всех органах. В частности, он получит широкое применение в операциях на сердце, в нейрохирургии.

Будет понят механизм воздействия лазерного излучения низкой интенсивности на злокачественные опухоли. Уже сейчас наблюдают избирательное действие лазерного луча

диаметром 1 мкм иа различиые клетки. Обнаружеио, что в зависимости от длииы волиы лазериый луч по-разиому действует иа живые иормальные и раковые клетки, на уже мертвые клетки. В результате подобных исследоваиий лазериая терапия стаиет, возможно, осиовиым методом лечения рака.

Будет исследоваио действие лазерного излучения иа состав крови и иа процесс кроветворения. Уже сейчас имеются очень интересиые даииые о влиянии интенсивиых инфракрасиых лазериых импульсов иа кровеиосиую систему и костный мозг. Отмечено, в частности, заметиое повышение в крови гемоглобиия, эритроцитов, кровяиых пластииок.

Будут выявлеиы иовые возможности лазериой биостимуляции. С помощью лазериого излучения удастся активизировать эиергетические процессы в иервной системе, еще более развить защитиые и восстаиовительиые способности человеческого оргаиизма. Современный человек глотает слишком миого таблеток — «от иервов», от простуды, при расстройствах тех или иных оргаиов. Он глотает их, когда ему больио или страшно, когда ему ие спится, когда ои взволноваи или удручеи. Так может быть, целительиый лазерный луч поможет ему освободиться, иакоиец, от этой вредиой привычки?

Справка. **Примеры отечественных лазерных медицинских установок.**

Лазерная хирургическая установка «Скальпель-1». Прнменяется прн операцнях на органах желудочно-кншечного тракта, прн остановке кровотеченнй нз острых язв желудочно-кишечного тракта, прн кожно-пластических операцнях, прн леченнн гнойных ран, прн гинекологических операцнях. В установке нспользуется непрерывногенерирующнй CO_2-лазер мощностью (на выходе светопровода) 20 Вт. Днаметр лазерного пятна может изменяться от 20 до 1 мм; днаметр пятна регулируется прнближеннем нлн удаленнем находящейся на конце выходной трубкн указкн относительно биологнческой тканн. Потребляемая мощность 1,4 кВт. Габарнтные размеры 60×80×180 см. Масса 250 кг.

Лазерная хирургическая установка «Саяны-МТ». Прнменяется в общей хирургни, онкологнн, проктологни. В установке нспользуется непрерывно-генернрующнй CO_2-лазер мощностью (на выходе светопровода) 35 Вт. Днаметр лазерного пятна может изменяться от 0,5 до 0,1 мм. Потребляемая мощность 1,7 кВт. Габарнтные размеры 217×220×50 см. Масса 350 кг.

Лазерная эндоскопнческая медицинская установка. Благодаря налнчию гнбкого волоконного световода н эндоскопа установка может прнменяться для внутриполостных операций н осмотров. Снабжена эндоскопамн разных тнпов, позволяющнми нспользовать установку в днагностике н лечении пнщевода, желудка, печени, двенадцатнперстной кншки, ободочной кишки, голосовых связок, бронхов, сердца, почек. В установку входнт аргоновый лазер непрерывного действня мощностью

7 Вт. Интенсивность лазерного излучения на выходе эндоскопа 150—250 Вт/см^2. Световод представляет собой гибкий волоконный жгут диаметром 1,5 мм; длина световода 2,25 м, диаметр отдельного волокна 5—10 мкм. С одного конца световод оптически согласован с лазером, другой конец световода пропущен в канал эндоскопа. Эндоскоп оптически связан с видеокамерой, которая в совокупности с видеомагнитофоном и телевизионной системой обеспечивает запись и воспроизведение изображения внутренней стенки органа. Габаритные размеры установки 150×75×140 см. Масса 400 кг.

Лазерная офтальмологическая установка «Ятаган». Предназначена для проведения микрохирургических операций переднего отдела глаза. Позволяет лечить глаукому и катаракту, не нарушая целостности наружных оболочек глаза. В установке используется импульсный лазер на рубине. Энергия излучения, содержащаяся в серии из нескольких световых импульсов, составляет 0,1—0,2 Дж. Длительность отдельного импульса 50—70 нс, интервал между импульсами в серии 15—20 мкс. Диаметр лазерного пятна 0,3—0,5 мм.

П р и м е ч а н и е. Установка «Ятаган» не имеет зарубежных аналогов. Она запатентована в США, Великобритании, Канаде, ФРГ, Франции, Италии и других странах.

Лазерная физиотерапевтическая установка УФЛ-1. Предназначена для лечения острых и хронических заболеваний челюстно-лицевой области; может использоваться для лечения длительно не заживающих язв и ран, а также в травматологии, гинекологии, хирургии (послеоперационный период). Используется биологическая активность красного луча гелий-неонового лазера (мощность излучения 20 мВт, интенсивность излучения на поверхности объекта 50—150 мВт/см^2). Габаритные размеры 50×51×142 см. Масса 110 кг.

ЛАЗЕРЫ В ЛОКАЦИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

Как осуществили лазерную локацию Луны? Осенью 1965 г. группа советских ученых выполнила уникальный эксперимент, позволивший определить расстояние до Луны с точностью до 200 м. Ученые использовали лазер на рубине, генерировавший гигантские импульсы длительностью $5 \cdot 10^{-8}$ с (50 нс). Для посылки лазерных импульсов к Луне и последующего приема импульсов, отраженных лунной поверхностью, применялся оптический телескоп Крымской обсерватории. Диаметр главного зеркала телескопа составлял 260 см.

Позднее, в 1969 г., на поверхность Луны высадились американские астронавты с «Аполлона-11», а в 1970 г. на лунную поверхность опустился управляемый с Земли советский космический аппарат «Луноход-1». Астронавты и луноход доставили на Луну специальные светоотражатели — катафоты. *Катафот* (его называют также *уголковым отражателем*) предназначен для того, чтобы возвращать падающий на него световой луч назад — в направлении, строго параллельном первоначальному направлению луча. Такой способностью обладает «уголок», образованный тремя плоскими зеркалами, ориентированными под прямыми углами друг к другу (рис. 21, *а*). Каково бы ни было направление попадающего в этот «уголок» светового луча, все равно после трех отражений от стенок (зеркал) «уголка» луч будет иметь направление, параллельное исходному. На практике вместо трех зеркал используют обычно призму, три грани которой образуют друг с другом прямые углы. Падающий луч, преломляясь, проходит внутрь призмы, испытывает полное внутреннее отражение поочередно от трех указанных граней и выходит из призмы параллельно падающему лучу. Преломление в данном случае не является помехой; ведь оба луча (входящий в призму и выходящий из нее) преломляются одинаково.

Используя отражение посылаемых с Земли коротких лазерных импульсов от уголковых отражателей, находя-

щихся на поверхности Луны, ученые смогли определить расстояние от Земли до Луны (точнее говоря, от зеркала земного телескопа до лунного отражателя) с погрешностью, не превышающей нескольких десятков сантиметров. Чтобы представить себе, насколько высока такая точность, надо вспомнить, что Луна находится на расстоянии 380 000 км от Земли. Погрешность измерения дальности, равная, скажем, 40 см, в 10^9 раз меньше указанного расстояния!

В настоящее время в мире существует несколько десятков *лазерно-локационных систем космического назначения.* Они осуществляют локацию Луны и геодезических

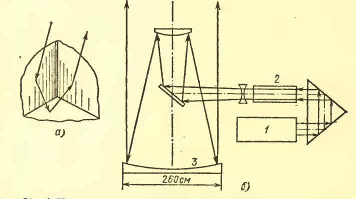


Рис. 21. *а*) Ход световых лучей в уголковом отражателе. *б*) Упрощенная схема лазерно-локационной системы космического назначения: *1* — лазер на рубине с электрооптическим затвором (генерирует импульсы длительностью 10 нс), *2* — квантовый усилитель, повышающий энергию лазерного импульса до 3 Дж (мощность такого импульса при длительности 10 нс достигает $3 \cdot 10^8$ Вт), *3* — главное зеркало телескопа.

искусственных спутников Земли. В качестве примера укажем лазерно-локационную систему Физического института имени П. Н. Лебедева АН СССР, предназначенную для локации Луны. Лазерная аппаратура смонтирована на 260-сантиметровом телескопе Крымской обсерватории. Упрощенная схема системы показана на рис. 21, *б*. Система позволяет измерять расстояние до лунных отражателей с точностью до 90 см. В дальнейшем за счет сокращения длительности лазерного импульса до 2 нс предполагается уменьшить погрешность измерения дальности до 25 см.

Но зачем измерять расстояние до Луны со столь огромной точностью? Неужели подобные довольно трудоемкие измерения делаются лишь из «спортивного интереса»?

Конечно же, нет. Проведение таких измерений организуют не для того, чтобы поточнее узнать расстояние от земного телескопа до лунного отражателя, а для того, чтобы поточнее определить *изменения* этого расстояния в течение некоторого промежутка времени, например, в течение недели, месяца, года. Исследуя графики, описывающие изменение расстояния со временем, ученые получают информацию для ответа на ряд вопросов, имеющих большую научную важность: как распределена масса в недрах Луны? С какой скоростью дрейфуют (сближаются или расходятся) земные континенты? Как изменяется со временем положение полюсов Земли? Неизменна ли постоянная тяготения или же она медленно уменьшается со временем?

Где применяются лазерные локаторы? Предположим, что сближаются два космических аппарата, предстоит их автоматическая стыковка. Необходимо точно контролировать взаимное положение аппаратов, точно измерять расстояние между ними. Для этого на одном из стыкующихся аппаратов устанавливают лазерный локатор. Рассмотрим конкретный локатор на основе CO_2-лазера, генерирующего регулярную последовательность световых импульсов с частотой следования 50 кГц. Лазерный луч сканируется построчно (подобно электронному лучу в телевизионной трубке) в пределах телесного угла $5° \times 5°$; время обзора лучом этого сектора пространства составляет 10 с. Лазерный локатор осуществляет поиск и опознавание стыкуемого аппарата в секторе $5° \times 5°$, непрерывное измерение его угловых координат и дальности, обеспечивает точное маневрирование вплоть до момента стыковки. Всеми операциями локатора управляет бортовая ЭВМ.

Импульсные лазерные локаторы сегодня используют не только в космонавтике, но и в авиации. В частности, они могут выполнять роль точных измерителей высоты. Заметим, что лазерный высотомер применялся также в космических кораблях «Аполлон» для картографирования поверхности Луны.

Основное назначение лазерных локаторов — такое же, как и радиолокаторов: обнаружение и опознавание удаленных от наблюдателя объектов, слежение за перемещением этих объектов, получение информации о характере объектов и их движении. Как и в радиолокации, в оптической локации для обнаружения объекта и получения информации о нем используются импульсы излучения, отраженные объектом. При этом оптическая локация обладает рядом преимуществ по сравнению с радиолокацией. Ла-

зерный локатор позволяет более точно определять координаты и скорость объекта. Более того, он дает возможность выявлять размеры объекта, его форму, ориентацию в пространстве. На экране лазерного локатора может быть получено видеоизображение объекта.

Преимущества лазерной локации связаны с возможностью формирования остронаправленных световых пучков, высокой частотой оптического излучения, исключительно малой длительностью световых импульсов (измеряемой наносекундами и даже пикосекундами). Действительно, остронаправленным лучом можно буквально «ощупать» объект, «просмотреть» разные участки его поверхности. Высокая частота оптического излучения позволяет более точно измерить скорость объекта. Напомним, что если объект движется на наблюдателя (от наблюдателя), то отраженный им световой импульс будет иметь уже не исходную частоту ν_0, а более высокую (более низкую) частоту ν; она определяется по формуле $\nu=\nu_0(1\pm 2u/c)$, где u — скорость движения объекта, c — скорость света, знак «+» относится к случаю, когда объект движется на наблюдателя, а «—» — от наблюдателя. Это хорошо известный *эффект Доплера.* Из приведенной формулы видно, что доплеровское смещение частоты $\Delta\nu$ (т. е. разность $|\nu-\nu_0|$) равно $2\nu_0 u/c$. Чем выше частота ν_0, тем больше измеряемое во время локации доплеровское смещение частоты $\Delta\nu$ и, следовательно, тем точнее может быть определена скорость объекта. Наконец, отметим важность использования в локации достаточно коротких импульсов излучения. Ведь измеряемое при помощи локатора расстояние до объекта есть $c\Delta t/2$, где Δt — промежуток времени от отправления зондирующего импульса до приема отраженного импульса. Ясно, что чем короче сам импульс, тем более точно можно определить этот промежуток времени, а следовательно, и расстояние до объекта.

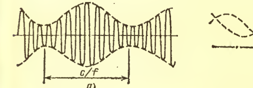
Впрочем, у оптических локационных систем есть и свои слабые стороны. Конечно, довольно удобно «осматривать» объект при помощи узкого остронаправленного луча лазера. Однако не так-то просто при помощи такого луча обнаружить объект; время обзора контролируемой области пространства оказывается в данном случае относительно большим. Поэтому оптические локационные системы часто используют в комплексе с радиолокационными. Последние обеспечивают быстрый обзор пространства, обнаруживают цель, а оптические системы затем измеряют параметры обнаруженной цели, осуществляют слежение

за целью. Кроме того, при прохождении оптического излучения через естественную среду (атмосферу, воду) возникают проблемы, связанные с воздействием среды на световой луч. Во-первых, свет поглощается в среде. Во-вторых, по мере распространения излучения по трассе происходит нарастающее искажение волнового фронта светового пучка вследствие турбулентности среды, а также рассеяния света на частицах среды. Все это ограничивает дальность действия наземных и подводных оптических локационных систем и ставит их работу в зависимость от состояния среды и, в частности, от погодных условий. Казалось бы, с этим никак нельзя бороться. Однако в последние годы открыли возможность целенаправленного исправления искажений волнового фронта светового пучка, распространяющегося в атмосфере или под поверхностью воды. Эту возможность исследует специальное направление в современной оптике, называемое *адаптивной оптикой*. Об адаптивной оптике мы поговорим позднее — в рассказе, посвященном нелинейной оптике.

Как работают лазерные дальномеры? Возможно, не все знают, что один из крупнейших в мире ускорителей частиц — синхротрон в Серпухове — имеет кольцевую вакуумную камеру длиной примерно 1,5 км. В поперечном же сечении камера имеет форму эллипса с осями 17 и 11,5 см. Внутри камеры мчатся постепенно ускоряющиеся сгустки протонов, описывая окружности диаметром около 0,5 км. Мы привели синхротрон как пример сооружения, где огромные габариты сочетаются с исключительно высокой точностью компоновки узлов. В наши дни таких сооружений становится все больше и больше. Это крупногабаритные оптические системы (например, системы для лазерного термоядерного синтеза), гигантские радиотелескопы с антеннами диаметром до сотен метров, стапели для современных авиалайнеров и морских судов. Сюда же надо отнести и многочисленные сложные инженерные сооружения — мосты, тоннели, высотные здания. При строительстве подобных сооружений, а также при решении различных геодезических задач требуется измерять и контролировать расстояния от десятков метров до нескольких километров с точностью до миллиметров и даже долей миллиметра. С этой задачей прекрасно справляются *лазерные дальномеры с непрерывным излучением*. Обычно их называют *геодезическими дальномерами*.

Лазер в таком дальномере генерирует непрерывное излучение, интенсивность которого модулируют во времени

по закону синуса с некоторой частотой f (в пределах примерно от 100 кГц до 500 МГц). Промодулированное излучение представляет собой световое поле, амплитуда которого (для любого фиксированного момента времени) периодически изменяется вдоль направления распространения светового пучка в соответствии с синусоидальной огибающей, имеющей пространственный период c/f (рис. 22,*а*). Излучение проходит путь, длину которого требуется измерить, отражается назад, проходит этот путь вторично и попадает на исходном конце трассы в прибор, называемый фазометром. Двойной проход по трассе (туда и обратно)



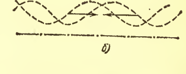


Рис. 22. *а*) Промодулированное излучение. *б*) Сдвиг фазы огибающей отраженного светового пучка.

требует определенного времени; в результате возникает соответствующий сдвиг (запаздывание) фазы огибающей отраженного светового пучка по отношению к фазе огибающей исходного пучка (рис. 22, *б*). Фазометр измеряет это запаздывание фазы; по нему и рассчитывается искомое расстояние.

В качестве примера отметим советский геодезический дальномер «Кварц» на основе гелий-неонового лазера мощностью 2 мВт. Частота модуляции f равна 753 МГц. Дальность действия до 1 км; погрешность измерения расстояния составляет 0,2 мм. Наряду с гелий-неоновыми лазерами в геодезических дальномерах применяют также инжекционные лазеры на арсениде галлия.

Как лазер помогает повысить точность работы современного фрезерного станка? Фрезерование — один из наиболее распространенных процессов металлообработки. Его сущность поясняет рис. 23. Заготовка устанавливается (закрепляется) на подвижном столе, который поступательно перемещается относительно вращающейся фрезы, как это показано на рисунке стрелкой. Существуют также иные варианты — когда заготовка неподвижна, а поступательно перемещается суппорт с вращающейся фрезой. При фрезеровании важна высокая точность установки заготовки на

столе станка и высокая точность перемещений стола или суппорта с фрезой. Это особенно важно при фрезеровании фасонных поверхностей (когда стол или суппорт совершают перемещения не в одном, а в трех измерениях) и поверхностей большой площади. В качестве примера отметим, что в авиационной промышленности при изготовлении лонжеронов (основных «силовых» элементов каркаса крыльев и фюзеляжа) требуется прецизионное фасонное фрезерование по большой площади; при этом суппорт

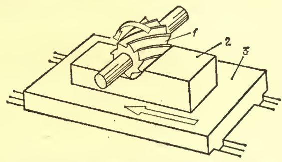


Рис. 23. Фрезерование: *1* — вращающаяся фреза, *2* — обрабатываемая металлическая заготовка, *3* — подвижный стол.

фрезерного станка совершает перемещения на расстояния до 40 м.

В таких условиях необходимо измерять и контролировать расстояния с исключительно высокой точностью — до нескольких микрометров. Контролируемые расстояния находятся в интервале примерно от сантиметра до нескольких десятков метров. Здесь удобно применять *интерферометрический метод* измерения расстояний с использованием лазера, чаще всего гелий-неонового. Принимаются меры, чтобы лазер генерировал лишь центральную продольную моду и чтобы ее частота была надежно стабилизирована.

На рис. 24, *а* приведена конкретная схема, иллюстрирующая данный метод измерения расстояний. Эта схема позволяет, в частности, контролировать перемещения суппорта фрезерного станка (или заготовки, закрепленной на подвижном столе станка). Луч, выходящий из лазера, расщепляется полупрозрачным зеркалом на два луча — опорный и измерительный. Опорный луч направляется на неподвижное отражающее зеркало, проходит путь L_0 и отражается назад. Измерительный луч направляется на уголковый отражатель, закрепленный на суппорте фрезы

(или на движущейся заготовке), проходит путь $L_и$ и тоже отражается назад. Оба отраженных луча попадают, в конечном счете, на фотоприемник, где происходит их интерференция. Результирующая интенсивность света, регистрируемая фотоприемником, зависит от разности фаз $\Delta\varphi$ интерферирующих световых лучей, которая, в свою очередь, зависит от разности путей ΔL, пройденных измерительным и опорным лучами: $\Delta\varphi=2\pi\Delta L/\lambda$ (здесь λ — длина волны лазерного излучения). Если $\Delta L=k\lambda$, где k — любое целое положительное число, то фотоприемник зарегистрирует максимальную интенсивность, а если $\Delta L=(2k+1)\lambda/2$,

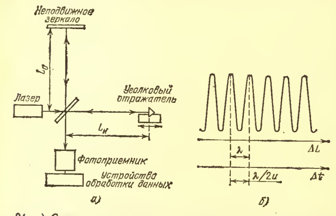


Рис. 24. а) Схема, иллюстрирующая интерферометрический метод измерения расстояний. б) Изменения интенсивности света, регистрируемой фотоприемником.

то минимальную. Так как $\Delta L=|L_и-L_0|$, то по мере перемещения отражателя будет изменяться ΔL. Заметим, что $\Delta L=2\Delta l$, где Δl — перемещение уголкового отражателя. По мере изменения ΔL будет изменяться и регистрируемая фотоприемником интенсивность света. Эти изменения показаны на рис. 24, б, где по горизонтальной оси отложены как значения ΔL, так и промежутки времени Δt ($\Delta L=2\Delta l=2u\Delta t$, где u — скорость перемещения отражателя). Предположим, что при перемещении отражателя из одного крайнего положения в другое максимумы и минимумы интенсивности света в фотоприемнике сменились N раз. Это означает, что суппорт фрезы (или заготовка) переместился на расстояние $\Delta l=N\lambda/2$. Длина волны света известна; надо лишь подсчитать число N. Оно, конечно, огромно,

так что подсчитывать его «на глазок» нельзя. Для этого используется электронное устройство обработки данных.

На практике лазерный интерферометр работает обычно в комплексе с устройством программного управления станком. Поэтому одновременно с контролем перемещений суппорта (заготовки) возможна автоматическая коррекция этих перемещений с тем, чтобы скомпенсировать погрешности, связанные, например, с неточностью установки заготовки или с износом режущего инструмента в процессе работы станка.

Существует достаточно много разновидностей *лазерных интерферометров*. И используют их, конечно, не только для повышения точности работы фрезерных станков. Лазерные интерферометры широко применяют в современной измерительной технике везде, где требуется измерять и контролировать расстояния до нескольких десятков метров с точностью до микрометров.

Как измерить толщину волоса? Вряд ли кому понадобится измерять толщину волоса. А вот измерять и контролировать диаметр тончайшей проволоки в процессе ее изготовления действительно нужно. Речь идет о проволоках диаметром порядка 10 мкм и меньше, которые, кстати говоря, значительно тоньше человеческого волоса (толщина волоса около 50 мкм).

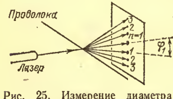


Рис. 25. Измерение диаметра тонкой проволоки.

Для измерения столь малых длин (наверное, лучше говорить толщин) используют явление *дифракции света*. Узкий лазерный луч от гелий-неонового лазера направляют на измеряемую проволоку перпендикулярно к ней и наблюдают на экране систему световых пятен, возникающую в результате дифракции света на проволоке (рис. 25). Условие дифракции имеет вид $\sin \varphi_n = n\lambda/d$, где d — линейные размеры препятствия, на котором происходит дифракция света (в данном случае это есть диаметр проволоки), λ — длина волны лазерного излучения, n — порядковый номер дифракционного светового пятна, φ_n — соответствующий ему угол дифракции. Измеряя расстояния между дифракционными пятнами на экране и расстояние от экрана до проволоки, можно рассчитать из условия дифракции диаметр проволоки.

Данный метод позволяет производить непрерывное измерение диаметра проволоки в процессе ее протягивания через фильеру. Пока диаметр протягиваемой проволоки неизменен, сохраняются и расстояния между дифракционными пятнами. При уменьшении диаметра проволоки эти расстояния возрастают, а при увеличении уменьшаются. На практике удается определить диаметр проволоки с погрешностью до 1% (при значении диаметра примерно от 2 до 10 мкм).

Как лазеры измеряют скорость частиц в потоке жидкости или газа? Одна из основных проблем аэродинамики и гидродинамики состоит в исследовании картины обтекания тел различной формы быстрым потоком газа или жидкости. Для этого надо уметь экспериментально определять модуль и направление скорости потока газа (жидкости) в разных точках потока. Обычно для определения скорости газа вносят в исследуемое место потока так называемую трубку Пито, измеряющую давление газа в данном месте. Применяют также термоанемометры, позволяющие судить о скорости потока по интенсивности теплоотдачи проволочки, нагреваемой электрическим током. В обоих методах в поток вносится зонд (в виде трубки Пито или нагретой проволочки), который, естественно, возмущает поток. В этом большой недостаток данных методов.

Чтобы не возмущать исследуемый поток, применяют оптические методы измерений. В прозрачный поток вводят в качестве небольшой примеси мелкие частицы, достаточно хорошо различимые в потоке. Для воды это могут быть полистироловые шарики диаметром 1 мкм, для газов — частицы дыма. Затем исследуемые участки потока́ фотографируют (с увеличением) и измеряют длину и направление зафиксированных на фотографии треков, представляющих собой смазанные изображения частиц, введенных в поток. При данном времени экспозиции длина трека тем больше, чем выше скорость частицы. Рассматриваемый метод отличается наглядностью, однако он очень трудоемок и к тому же позволяет выявить распределение скоростей в потоке лишь для некоторого (или некоторых) момента времени.

Более предпочтителен метод, в котором используется рассеяние лазерного излучения частицами, введенными в поток газа (жидкости). Ранее мы уже говорили о том, что в результате эффекта Доплера изменяется частота света при отражении от движущейся поверхности. Эффект Доплера проявляется также в изменении частоты света при его

рассеянии движущимися в потоке частицами. Изменение частоты света пропорционально скорости потока. На этом и основано действие лазерных измерителей скорости потока. Их называют *лазерными доплеровскими анемометрами*.

Существуют различные оптические схемы таких анемометров. Одна из них показана на рис. 26. Здесь рассматривается простой случай, когда все частицы потока движутся в одном определенном направлении; их скорость может различаться только по модулю. Световой луч, генерируемый лазером (это может быть, например, гелий-неоновый

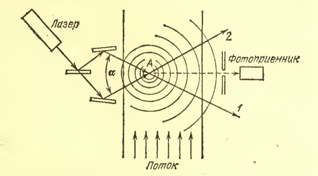


Рис. 26. Схема лазерного доплеровского анемометра.

лазер непрерывного действия мощностью 10 мВт), преобразуется системой зеркал в два взаимно пересекающихся луча, распространяющихся под углом α друг к другу (лучи *1* и *2*). Аппаратура устанавливается таким образом, чтобы эти лучи пересекались друг с другом в том месте потока, где требуется измерить скорость; в данном случае это есть область потока вблизи точки A. В рассматриваемой схеме фотоприемник улавливает ту часть излучения, рассеянного вблизи точки A, которая распространяется перпендикулярно потоку. Улавливаемое фотоприемником излучение содержит две рассеянные световые волны. Одна возникает в результате рассеяния светового пучка *1*; ее частота есть $\nu_1=\nu\ [1-\sin(\alpha/2)u/v]$, где ν — частота лазерного излучения, u — скорость потока в точке A, v — скорость света в среде потока. Другая волна возникает в результате рассеяния светового пучка *2*; ее частота есть $\nu_2=\nu[1+\sin(\alpha/2)u/v]$. Рассматриваемые волны интерферируют; в результате фотоприемник регистрирует колебания интенсивности света, имеющие частоту, равную разности

частот интерферирующих волн (так называемую *частоту биений*): $f=\nu_2-\nu_1=2\nu\sin(\alpha/2)u/v$. В соответствующем устройстве колебания световой интенсивности преобразуются в электрический сигнал, модулированный с частотой биений f. Измеряя частоту модулированного электрического сигнала и используя приведенное выше соотношение, рассчитывают скорость потока u в точке A.

Лазерные доплеровские анемометры обладают рядом преимуществ. В процессе измерения они не вносят в поток каких-либо искажений; излучение лазера имеет в данном случае малую мощность и поэтому практически не нагревает поток. Необычайно широк диапазон измеряемых скоростей — от ничтожных скоростей порядка долей микрометра в секунду (с такой скоростью растут растения и движутся ледники) до скоростей порядка 10 км/с (такие скорости в десятки раз превышают скорость звука). Для измерений характерна высокая локальность: их можно выполнять в пределах области диаметром всего 10 мкм (в пределах области, охватываемой сфокусированным лазерным пятном). Возможные температуры потока практически не ограничены, они лежат в очень широком диапазоне значений — от температур криогенных жидкостей до температур горячей плазмы. Наконец, лазерный метод измерения скорости отличается высоким быстродействием, что позволяет исследовать быстропротекающие процессы в газах и жидкостях.

Благодаря всем этим достоинствам лазерные доплеровские анемометры нашли необычайно широкое применение. Они используются при изучении особенностей конвекции жидкости, турбулентных течений в различных жидкостях и газах, ударных волн, возникающих в сверхзвуковых потоках газа. Их применяют также для исследования высокотемпературных потоков плазмы и сверхохлажденных потоков криогенных жидкостей, при анализе движения крови по кровеносным сосудам и при изучении движения ледников. Лазерные доплеровские анемометры с полным основанием могут быть названы универсальными измерителями скорости.

Что такое лазерный гироскоп и чем он интересен? Лазерный гироскоп совсем не похож на обычный гироскоп, который представляет собой тело, быстро вращающееся вокруг своей оси. Общее между этими гироскопами лишь в тех задачах, которые они выполняют.

Лазерный гироскоп — это лазер с кольцевым резонатором. Такой резонатор содержит три или более зеркал,

расположенных в одной плоскости таким образом, чтобы излучение циркулировало по замкнутому контуру. На рис. 27, *а* схематически показан лазерный гироскоп с трехзеркальным резонатором. Траектория излучения в резонаторе соответствует периметру равностороннего треугольника. В лазере с кольцевым резонатором генерируются две бегущие световые волны, распространяющиеся внутри резонатора навстречу друг другу. Одна обегает резонатор в направлении по часовой стрелке, а другая — в обратном направлении. Пусть ν — частота этих волн.

Предположим теперь, что лазерный гироскоп находится на платформе, которая вращается с угловой скоростью Ω

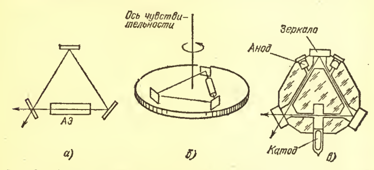


Рис. 27. *а*) Схема лазерного гироскопа с трехзеркальным резонатором. *б*) Лазерный гироскоп на вращающейся платформе. *в*) Разрез применяемой на практике конструкции лазерного гироскопа.

вокруг оси, перпендикулярной плоскости резонатора — ее называют осью чувствительности лазерного гироскопа (рис. 27, *б*). В этом случае частоты бегущих волн, генерируемых в лазерном гироскопе, оказываются разными. Волна, которая обегает резонатор в направлении, совпадающем с направлением вращения платформы, имеет частоту $\nu_1=\nu(1-2\Omega S/cL)$, а встречная волна имеет частоту $\nu_2=\nu(1+2\Omega S/cL)$. Здесь S — площадь многоугольника (в данном случае треугольника), по периметру которого распространяется излучение, а L — длина периметра. Сдвиг частоты волн во вращающемся кольцевом резонаторе можно рассматривать как проявление уже неоднократно упоминавшегося ранее эффекта Доплера.

Из приведенных соотношений следует, что разность частот встречных бегущих световых волн равна $f=\nu_2-\nu_1=4\nu\Omega S/cL$. Эти волны выводятся из резонатора, совмещаются друг с другом и попадают в фотоприемник. В ре-

зультате интерференции волн фотоприемник регистрирует колебания световой интенсивности с частотой f (это есть уже упоминавшаяся ранее частота биений). Измеряя f, можно рассчитать угловую скорость Ω.

Таким образом, лазерные гироскопы могут использоваться (и действительно широко используются) в качестве измерителей угловой скорости вращающихся тел. Диапазон измеряемых ими угловых скоростей весьма широк — примерно от 10^{-6} до 10 рад/с; погрешность измерения — до 10^{-8} рад/с. Лазерные гироскопы могут измерять даже угловую скорость вращения Земли.

В современных конструкциях лазерных гироскопов обычно применяется трехзеркальный резонатор; в качестве активной среды используют смесь гелия и неона. Гироскоп изготавливают в сплошном куске кварца, вытачивая внутри соответствующие каналы для световых лучей и полости для размещения в них электродов. К обработанной кварцевой заготовке после монтажа электродов прикрепляют в соответствующих местах зеркала резонатора, затем откачивают внутренние полости и заполняют их смесью гелия и неона. На рис. 27, *в* в упрощенном виде дан разрез такой конструкции лазерного гироскопа. Он очень компактен и надежен в работе, умещается на ладони.

Лазерные гироскопы находят разнообразные применения. Они используются, например, в качестве гирокомпасов — навигационных приборов, позволяющих, в частности, определять направление на север. Существуют разные практические схемы лазерных гирокомпасов. Простейший вариант таков. Ориентируют плоскость кольцевого резонатора таким образом, чтобы его ось чувствительности оказалась в плоскости горизонта, и измеряют соответствующую составляющую угловой скорости вращения Земли. Затем постепенно поворачивают гироскоп так, чтобы ось чувствительности, изменяя направление, все время оставалась в горизонтальной плоскости. Находят такое положение, когда регистрируемая гироскопом составляющая угловой скорости вращения Земли оказывается наибольшей (по сравнению с другими положениями). Направление оси чувствительности гироскопа в данном положении и будет направлением на север.

Любой находящийся в полете аппарат (самолет, ракета, искусственный спутник Земли) при отклонениях от прямолинейной траектории совершает вращательные движения в той или иной плоскости. Контролируя угловую скорость и углы поворота при всех этих движениях, можно тем

самым контролировать как траекторию полета аппарата, так и его ориентацию в пространстве. Вот почему лазерные гироскопы широко используются в качестве бортовой аппаратуры ориентации и наведения в современной авиации и в космонавтике. При этом применяют трехмерные гироскопы — гироскопы с тремя кольцевыми резонаторами, плоскости которых взаимно перпендикулярны. Они выполняются в сплошном кварцевом блоке в виде шара, в котором высверливаются каналы для световых лучей в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Именно такие лазерные гироскопы позволяют контролировать повороты аппарата во всех трех измерениях.

Справка. **Примеры отечественных и зарубежных лазерных локационных и дальномерных устройств.**

Лазерно-локационные системы космического назначения

Страна, организация	Назначение	Активный элемент	Энергия импульса, Дж	Длительность импульса, нс	Погрешность измерения, см
СССР, Физический институт АН СССР	Луна	Рубин	2,5	10	90
СССР, То же	Луна	Рубин	3	2	25
США, Космический центр	ИСЗ	Рубин	0,25	4	8
ГДР, Институт физики Земли	ИСЗ	Рубин	1—2	15—25	80—120
Франция, Национальный центр	ИСЗ	Рубин	1	12	40

Лазерные дальномеры с непрерывным излучением (геодезические дальномеры)

Страна, тип прибора	Активная среда	Длина волны, мкм	Мощность, мВт	Дальность действия, км	Погрешность измерения, мм
СССР, КДГ-3	Арсенид галлия	0,91	1	2	20
СССР, «Кварц»	Гелий — неон	0,63	5	30	10
СССР, »	Гелий — неон	0,63	2	1	0,2
США	Гелий — неон	0,63	5	60	0,5
Франция	Гелий — неон	0,63	5	60	5
Швеция	Арсенид галлия	0,91	1	1,7	5

ЧТО ТАКОЕ ОПТИЧЕСКАЯ ГОЛОГРАФИЯ

Можно ли «заморозить» световую волну? Чтобы подольше сохранить ягоды, их замораживают. В таком виде они могут долго храниться в холодильнике. Через некоторое время их достают из холодильника и восстанавливают, или, выражаясь проще, размораживают. Так поступают с ягодами. Но можно ли проделать нечто подобное со световыми волнами?

Задумаемся над тем, что означает слово «видеть». Мы *видим* какой-то объект — это означает, что наши глаза улавливают световые волны, несущие в себе информацию о внешнем виде объекта. Как возникают эти волны? Казалось бы, зачем об этом спрашивать. Ведь ясно, что это световые волны, отражаемые поверхностью объекта. Свет от какого-нибудь осветителя падает на поверхность объекта и частично отражается от нее. Пока источник света не выключен, происходит непрерывный процесс возникновения отраженных объектом световых волн. Все они повторяют одна другую, все они имеют одну и ту же форму волнового фронта. Улавливаемые глазами наблюдателя, они и порождают зрительный образ объекта.

Итак, чтобы «видеть» объект, надо воспринимать (при помощи органов зрения) поток световых волн с соответствующей данному объекту формой волнового фронта. Обычно для этого требуется, чтобы сам объект находился перед наблюдателем. Однако обязательно ли это? Нельзя ли воспроизводить такие световые волны в отсутствие объекта?

Оказывается, это возможно. Как раз этим и занимается *оптическая голография* — новое научно-техническое направление современной оптики, активно использующее когерентность лазерного излучения.

Общая идея такова. Сначала изготавливается «устройство», в котором фиксируется и сохраняется вся информация о внешнем виде объекта, содержавшаяся в отраженной от объекта световой волне. (Термин «голография» переводится как «полная запись»: от греческих holos —

весь, полный и grapho — *пишу*.) Такое «устройство» называют *голограммой* данного объекта. Впоследствии, когда нам понадобится, уже в отсутствие объекта, это «устройство» (голограмма) используют для воспроизведения потока световых волн, в точности копирующих ту световую волну, которая в свое время отразилась от объекта. Получается, что вначале мы как бы «заморозили» отраженную объектом световую волну, а впоследствии, уже не пользуясь объектом, восстановили (как бы «разморозили») эту волну. Впрочем, здесь требуется небольшое уточнение. Мы «замораживаем» световую волну, отраженную от объекта в какой-то определенный момент времени, а впоследствии воспроизводим (так долго, как это потребуется) непрерывный поток световых волн, копирующих волну, которую «заморозили». Так что аналогии с замораживанием-размораживанием ягод здесь, по сути дела, нет.

Как уже отмечалось, «замораживание» волны и последующее воспроизведение ее точных копий осуществляют на практике при помощи «устройства», называемого голограммой. Правда, как-то неловко говорить о голограмме как об устройстве. Ведь в сущности это всего лишь некоторая «картинка», зафиксированная на фотопластинке. Разглядывая голограмму под микроскопом, мы обнаружим сложную картину из тонких полос. Это *интерференционные полосы*. Они образуются вследствие интерференции волны, отраженной объектом (ее называют *объектной* волной), и вспомогательной *(опорной)* световой волны. «Замораживание» объектной волны происходит в момент образования интерференционных полос. В их сложном переплетении и заключена информация о форме фронта «замороженной» волны. Процесс создания и закрепления интерференционной картины называют процессом «записи голограммы». Фактически это есть процесс создания голограммы, поскольку до него голограммы просто не было, а была лишь неиспользованная фотопластинка.

Внешне голограмма похожа на засвеченный негатив и не имеет ничего общего с фотографическим изображением объекта. Но поставим ее под нужным углом в специально расширенный лазерный пучок (например, в пучок от гелий-неонового лазера), и мы увидим, как в ней просветлится своеобразное «окошко», внутри которого возникнет объект, причем он предстанет совершенно реалистичным, объемным, таким, каким он представлялся нам, когда мы разглядывали непосредственно сам объект. Это до неправдоподобия реалистичное видение возникает в упомянутом

«окошке» где-то позади голограммы. Самого объекта там, естественно, нет. Мы воспринимаем зрительно лишь световые волны, являющиеся копиями волны, «записанной» на голограмме. Процесс воссоздания этих световых волн называют процессом «восстановления голограммы», или, иначе, «считывания голограммы».

Мы видим, что для считывания голограммы понадобился лазерный луч. Еще более важную, более принципиальную роль лазерный луч играет на этапе записи голограммы. Позднее мы узнаем, что существуют голограммы, считываемые в солнечном свете и даже свете обычной лампы накаливания. Запись же голограмм всегда производится с использованием лазерного излучения.

Перейдем теперь к конкретному рассмотрению процессов записи и считывания голограммы. Это поможет нам понять основные принципы оптической голографии.

Каковы основные принципы оптической голографии? Нам достаточно рассмотреть простую (идеализированную) ситуацию — когда объект *точечный*. На рис. 28, *а* показана одна из схем записи голограммы этого объекта. На

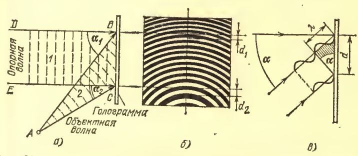


Рис. 28. *а*) Схема записи голограммы. *б*) Вид голограммы точечного объекта. *в*) Поясняющий рисунок.

фотопластинку падают две световых волны — отраженная от объекта *A* сферическая волна *2* (объектная волна) и вспомогательная плоская волна *1* (опорная волна). Заметим, что волна называется плоской или сферической в соответствии с формой ее фронта; сечения волновых фронтов показаны на рисунке штриховыми линиями. В результате интерференции волн *1* и *2* на фотопластинке образуется *система интерференционных полос*; она показана (с увеличением) на рис. 28, *б*. Это есть голограмма точечного объекта. Расстояния между соседними полосами различны в разных местах голограммы; в каждом месте это расстоя-

ние равно отношению длины волны света к синусу угла, который образуют друг с другом объектный и опорный световые лучи, встречающиеся в данной точке поверхности голограммы (в этом можно убедиться, обратившись к вспомогательному рис. 28, *в*). На рис. 28, *а* выделены всего два объектных луча (лучи AB и AC) и два соответствующих им опорных луча (лучи DB и EC); углы между лучами (углы интерференции) обозначены как α_1 и α_2. Для участков поверхности голограммы вблизи точек B и C расстояния между соседними интерференционными полосами равны соответственно $d_1=\lambda/\sin\alpha_1$ и $d_2=\lambda/\sin\alpha_2$, где λ — длина волны света (рис. 28, *б*).

Теперь рассмотрим этап считывания полученной голограммы; он показан на рис. 29. Направим на голограмму *считывающую* световую волну (волна *1*), которая должна

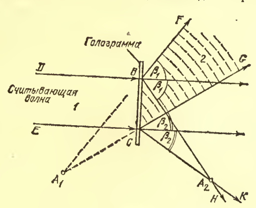


Рис. 29. Считывание голограммы.

быть точной копией опорной волны, использовавшейся на этапе записи голограммы. Частично считывающая волна пройдет сквозь голограмму без изменений, а частично *испытает дифракцию* на структуре интерференционных полос, зафиксированной на голограмме,— возникнут две *дифрагированные* световые вóлны. Выделим в считывающей волне два световых луча: DB и EC. Луч DB падает на участок голограммы, где расстояние между интерференционными полосами есть d_1; он будет дифрагировать под углом дифракции β_1, определяемым из условия дифракции: $\sin\beta_1=\lambda/d_1$ (напомним, что условие дифракции уже использовалось ранее: см. пятый рассказ, пункт «Как измерить толщину волоса?»). Так как $d_1=\lambda/\sin\alpha_1$, то, сле-

довательно, $\beta_1=\alpha_1$. Соответственно для луча EC находим, что $\beta_2=\alpha_2$. Здесь проявляется общее правило: угол дифракции в каждой точке голограммы равен углу интерференции для этой точки. Дифрагированные лучи BF и CG принадлежат дифрагированной волне *2*, а лучи BH и CK — волне *3* (см. рис. 29). Используя эти лучи, мы находим два изображения точечного объекта, восстанавливаемые с голограммы — *мнимое* (изображение A_1) и *действительное* (изображение A_2).

На рис. 29 выделена дифрагированная световая волна *2*. Легко видеть, что она является точной копией объектной волны *2*, использовавшейся на этапе записи голограммы. Таким образом, мы убеждаемся, что в результате дифракции считывающей волны на голограмме рассматриваемого объекта действительно воспроизводится волна, являющаяся копией объектной волны. В данном случае эта волна формирует мнимое изображение объекта.

Представим теперь, что вместо точечного объекта имеется реальный *трехмерный* объект. Отраженную этим объектом волну мы можем рассматривать как сумму (суперпозицию) сферических волн, порожденных различными точками отражающей поверхности объекта. Голограмма восстанавливает каждую из этих сферических волн; следовательно, она восстанавливает объектную волну, отраженную трехмерным объектом. При считывании голограммы наблюдатель будет воспринимать эту световую волну, являющуюся точной копией объектной волны; в результате он увидит *объемное* мнимое изображение объекта. Поскольку наблюдатель воспринимает точно такую же световую волну, какая отражалась бы непосредственно от самого объекта, то наблюдаемое мнимое изображение объекта оказывается не просто объемным. Оно будет выглядеть таким же *реалистичным*, как и сам объект. Меняя точку наблюдения, можно увидеть, как объект меняет свою ориентацию, «поворачиваясь» к нам той или иной стороной, как выступают новые детали, которые до этого загораживались объектом.

Заметим, что всеми признаками реального объекта обладает в данном случае только мнимое изображение. Ведь именно оно формируется световой волной, являющейся копией объектной волны. Действительное же изображение выглядит как бы «вывернутым наизнанку» — те точки объекта, которые находились дальше от наблюдателя, будут представляться теперь расположенными ближе. Такое изображение называют *псевдоскопичным*. Если

изменить схему считывания голограммы, посылая считывающую волну в направлении, *обратном* направлению опорной волны (надо освещать голограмму с обратной стороны), то тогда действительное изображение станет реалистичным, а мнимое будет псевдоскопичным.

Иногда можно услышать: голограмма восстанавливает объемное изображение объекта. Читатель, внимательно следивший за нашими рассуждениями, сразу же почувствует бедность такого заключения. Голограмма восстанавливает не просто объемное изображение объекта, а нечто гораздо более существенное — *объектную световую волну*. И поэтому изображение объекта (мнимое или действительное) оказывается не просто объемным, а *реалистичным*.

Рассмотренный пример хорошо демонстрирует двухступенчатый (двухэтапный) характер голографического метода получения изображений. На первом этапе голограмму записывают. Изображение же объекта получают лишь на втором этапе — при считывании голограммы. Запись голограммы основана на использовании явления *интерференции* световых волн, а считывание — на явлении *дифракции* света. Для интерференции световых волн принципиально важно, чтобы эти волны обладали достаточно высокой *когерентностью*. Поэтому для записи голограммы необходимо излучение лазера. Лучом лазера освещают голографируемый объект, этот же луч используют и в качестве опорного. Выше мы говорили, что считывающая световая волна должна быть копией опорной волны. Отсюда следует, что луч лазера необходим также и для считывания голограммы. Этот вывод, однако, не является категоричным. Существуют голограммы, которые можно считывать солнечным светом или даже светом электрической лампы. Это так называемые *объемные* отражательные голограммы. Они существенно отличаются от использовавшихся в предыдущих рассуждениях *плоских* голограмм.

Чем отличаются объемные голограммы от плоских? Они отличаются толщиной фоточувствительного слоя, в котором фиксируется интерференционная картина. Если толщина слоя порядка длины световой волны, голограмму называют плоской, а если существенно больше длины волны — объемной. Характерная толщина слоя у объемных голограмм около 20 мкм, что в 30 раз больше длины волны гелий-неонового лазера.

Плоская голограмма фиксирует результат интерференции объектной и опорной волн *на плоскости*, а объемная

голограмма — *в объеме*. Поэтому, если в плоской голограмме реализуется плоская картина *интерференционных полос*, то в объемной голограмме мы имеем дело с пространственной структурой, состоящей из *интерференционных слоев*. При этом надо иметь в виду, что сама фотоэмульсия практически совершенно прозрачна.

Дифракция света на объемной слоистой структуре имеет качественные отличия от дифракции на плоской структуре из полос. Особенно ярко они проявляются в случае *отражательных* объемных голограмм — когда дифрагированная световая волна оказывается волной, отраженной от голограммы.

Это отражение особенное, так как является, по сути дела, не отражением, а дифракцией. Мы уже встречались с ним, когда во втором рассказе говорили об акустооптическом затворе. Там происходила дифракция света на слоистой структуре из уплотнений и разрежений среды, возникающей при распространении в среде ультразвуковой волны. Это есть так называемое *брэгговское отражение*. Оно названо по имени английского физика У. Л. Брэгга, который установил условие возникновения рассматриваемого «отражения» (независимо от Брэгга это условие было получено русским ученым Г. В. Вульфом): $\sin\theta=\lambda/2d$. Здесь θ — угол между падающим световым лучом и плоскостью слоя (а также между отраженным лучом и плоскостью слоя), d — расстояние между соседними слоями, λ — длина волны излучения. Брэгговское отражение иллюстрирует рис. 30, где слои, для простоты, выбраны плоскими. В объемной голограмме интерференционная структура состоит из искривленных слоев.

Рис. 30. Брэгговское отражение света: *1* — падающая (считывающая) световая волна, *2* — отраженная (испытавшая дифракцию) волна.

Условие брэгговского отражения связывает угол отклонения светового пучка (угол 2θ) и его длину волны с расстоянием между слоями. Предположим, что в падающем световом пучке представлены различные длины волн. Ясно, что в отраженном (дифрагированном) пучке будет представлена лишь та длина волны, которая соответствует расстоянию между слоями. Получается, что слоистая структура *автоматически* «отбирает» из совокупности па-

дающих лучей лучи с нужной длиной волны. Такой «автоматизм» является замечательной особенностью отражательных объемных голограмм. Он позволяет считывать эти голограммы в солнечном свете или свете от обычных осветителей. Из падающего на нее света голограмма сама «отбирает» лучи с той длиной волны, какая использовалась на этапе записи голограммы. Надо лишь позаботиться, чтобы фронт считывающей волны не слишком сильно отличался от плоского. Кроме солнечных лучей этому требованию хорошо удовлетворяют также лучи обычного проекционного аппарата.

Объемные голограммы были предложены советским ученым Ю. Н. Денисюком. Поэтому их называют также *голограммами Денисюка*. Они находят широкое применение в изобразительной голографии. Имея в виду прежде всего научные применения голографии, мы ограничимся далее рассмотрением только плоских голограмм.

Как выглядит оптическая голографическая лаборатория? Чтобы сделать голограмму какого-нибудь объекта, надо иметь лазер, материал для записи голограммы и специальный голографический стенд с размещенными на нем в определенных положениях оптическими элементами (зеркалами, светоделителями, линзами). Голографический стенд обычно представляет собой массивную стальную плиту достаточной площади (например, 2×2 м). Чаще всего используют непрерывно генерирующий гелий-неоновый лазер, мощность которого измеряется милливаттами. В специальных случаях применяют импульсный лазер на рубине.

При использовании маломощного гелий-неонового лазера время экспозиции (время записи голограммы) оказывается относительно большим. Поэтому должны выполняться весьма жесткие требования в отношении неподвижности всех элементов схемы в течение экспозиции. Фиксированные положения элементов должны выдерживаться с точностью до четверти длины волны света, т. е. с точностью до 0,1 мкм. Если это условие не выполняется, то интерференционная картина на голограмме размазывается, полосы взаимно перекрываются. Казалось бы, ничто не нарушает неподвижности объекта, зеркал, линз, расставленных на стальной плите. Но это не так. Неподвижность нарушают вибрации стен и пола лаборатории, фундамента здания. В любом городе более чем достаточно причин для появления этих вибраций — движение транспорта, работа промышленных установок и т. п. Обычно мы не ощущаем этих вибраций. Тем не менее они суще-

ствуют и, несмотря на кажущуюся незначительность, способны помешать записи голограммы. Чтобы избавиться от вибраций, стенд делают достаточно массивным и предусматривают хорошую амортизацию, например, кладут стальную плиту на надутые автомобильные камеры.

Оптические схемы записи голограмм разнообразны. Они зависят, в частности, от того, какой объект или какую сцену надо записать на голограмму. Одна из типичных

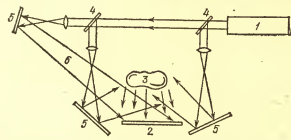


Рис. 31. Практическая схема записи голограммы: *1* — лазер, *2* — голограмма, *3* — объект, *4* — полупрозрачные зеркала (светоделители), *5* — полностью отражающие зеркала, *6* — опорная световая волна.

схем записи голограммы показана на рис. 31. Лазер является источником всех используемых в схеме световых пучков.

Какие материалы используются для записи голограмм? Фиксируемая на голограмме интерференционная картина имеет очень тонкую структуру; расстояния между полосами могут быть порядка всего 1 мкм. Поэтому необходимы материалы с *очень высоким пространственным разрешением*. Под последним понимается максимальное число параллельных линий на единице длины (обычно на миллиметре), которое позволяет различить данный материал. Пространственное разрешение материалов, используемых для записи голограмм, должно быть порядка тысячи линий на миллиметре или даже выше.

В голографии используют *фотоматериалы*, обладающие необходимым пространственным разрешением. Напомним, что фотоэмульсия состоит из мелких зерен бромистого серебра, вкрапленных в прозрачную желатиновую массу. Поэтому проявленное изображение состоит из отдельных «пятен» (своеобразных «кирпичиков» изображения). Если детали изображения меньше размеров этих «пятен», то такие детали оказываются неразличимыми. Ясно, что для повышения разрешения надо изготавливать фото-

материалы с более мелкой зернистой структурой. Однако уменьшение зерен всегда связано с понижением светочувствительности материала (ведь поглощаемый фотоэмульсией фотон воздействует на все зерно как целое; чем крупнее зерна, тем меньшее количество фотонов требуется для получения всего изображения). Создание необходимых для голографии фотоматериалов, обладающих высоким разрешением и в то же время достаточно хорошей светочувствительностью,— серьезная техническая проблема. В настоящее время широко используются фотопленки с разрешением 1500—2000 $мм^{-1}$. Они имеют светочувствительность 10^{-2} Дж/$см^2$ (такова должна быть минимальная интенсивность света на засвечиваемых участках поверхности голограммы). Применяют также фоторезисторы — органические фотоматериалы, позволяющие при светочувствительности 10^{-2} Дж/$см^2$ реализовать разрешение 3000 $мм^{-1}$. Существуют экспериментальные фотоматериалы с особо мелкой структурой, обладающие разрешением выше 5000 $мм^{-1}$.

Все фотоматериалы имеют, однако, общий недостаток. Нельзя стереть записанную на данной фотопластинке или фотопленке голограмму и затем записать на ней новую. Фотоматериалы являются *необратимыми* регистрирующими средами или, иными словами, средами *однократного применения*.

Существуют также *обратимые* регистрирующие среды, допускающие *стирание* и *повторную запись* голограмм. Таких сред немало. К ним относятся магнитные пленки, изменяющие намагниченность под действием света, фотохромные материалы и жидкие кристаллы, изменяющие под действием света свою прозрачность, пленки из термопластика, изменяющие под действием света свою толщину, и ряд других материалов. Их применение основано на использовании различных физических явлений. В отличие от фотоматериалов все они позволяют стирать записанную интерференционную картину и, кроме того, не требуют длительной обработки. Здесь нет длительного процесса проявления и закрепления изображения, неизбежного при работе с фотоматериалами.

В качестве примера рассмотрим подробнее, как записывают голограммы на термопластиках. *Термопластики* — специфические прозрачные диэлектрики, размягчающиеся при относительно невысоких температурах (например при 50 °С). Голограмма фиксируется на термопластике в виде соответствующей *картины рельефа* его поверхности. Тер-

мопластик наносят на слои из полупроводника и проводящего материала. Чередование слоев показано на рис. 32. Все слои, включая и проводящий, практически полностью прозрачны.

Запись голограммы производят так. Сначала поверхность термопластика равномерно заряжают в темноте при помощи коронного разряда — того самого разряда, который низким жужжанием напоминал вам о своем существовании всякий раз, когда вам случалось проходить под проводами высоковольтной линии. Возникает своеобразный конденсатор, пластинами которого служат заряженная поверхность термопластика и проводящий слой (рис. 33, *а*). Затем термопластик освещают опорной и объектной световыми волнами. На освещенных участках резко возрастает проводимость полупроводника (явление фотопроводимости), в результате расстояние между пластинами нашего «конденсатора» на этих участках уменьшается (рис. 33, *б*). Заметим, что напряженность электрического поля внутри

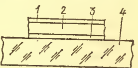


Рис. 32. Разрез структуры голограммы на термопластике: *1* — слой термопластика, *2* — слой полупроводника, *3* — проводящий слой, *4* — стеклянная основа.

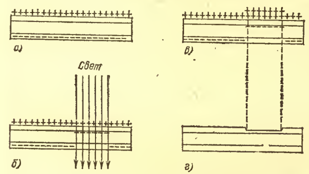


Рис. 33. Этапы записи голограммы на термопластике.

конденсатора при этом не меняется (она определяется лишь плотностью поверхностных зарядов). Уменьшение же расстояния между пластинами конденсатора при неизменной напряженности поля приводит к уменьшению разности потенциалов между пластинами. Следовательно, потенциал освещенных участков поверхности термопластика понижается. Далее повторно заряжают поверхность

термопластика, в результате чего ее потенциал везде принимает первоначальное значение. При этом на освещенных участках поверхности термопластика концентрируются дополнительные заряды (рис. 33, *в*). Наконец, термопластик нагревают до его размягчения. Под действием кулоновских сил отталкивания формируется определенный рельеф поверхности размягченного термопластика, который закрепляется после охлаждения (рис. 33, *г*).

Голограмма на термопластике прозрачна как стекло. Однако свободно проходящий сквозь нее считывающий световой пучок прекрасно «ощущает» все неровности рельефа, поскольку в зависимости от толщины голограммы изменяется длина оптического пути луча, а следовательно, и фаза световой волны. Такие голограммы называют *фазовыми*. В отличие от них голограммы на фотоматериалах могут быть названы *амплитудными*.

Пространственное разрешение термопластика достигает 1000 $мм^{-1}$ при достаточно хорошей светочувствительности (10^{-3} $Дж/см^2$). Для стирания записанного на термопластике рельефа его надо нагреть, после этого на термопластик можно записывать новую голограмму.

Чем интересна и перспективна оптическая голография? На первый взгляд фотография предпочтительнее голограммы. Ведь на фотографии все видно, тогда как чтобы увидеть что-то на голограмме, ее надо осветить лазерным лучом (речь идет о плоских голограммах). Можно сказать, что на голограмме фиксируется *зашифрованное* изображение, которое требуется при помощи лазера расшифровать. Это кажущееся неудобство с лихвой окупается теми возможностями, которые открывает голография перед исследователем и инженером. Более того, именно упомянутая «зашифрованность» записанного изображения и обусловливает богатые возможности голографии.

Позволяя восстанавливать реальные световые волны, голограмма тем самым дает нам возможность *управлять оптическими полями* (возможность, совершенно недоступную для фотографии). Естественно, что изображение, считываемое с голограммы, отличается от фотографического своей объемностью, реалистичностью, жизненностью.

Предположим, что какая-то группа людей, желая сохранить память о встрече, снялась сначала на фотографию, а потом на голограмму (для записи голограммы использовался импульсный лазер). Потом случился пожар, во время которого у обоих снимков выгорело около четверти площади. Через некоторое время потребовалось

опознать одного из фотографировавшихся. Когда взяли фотографию, то выяснилось, что это лицо там отсутствует; оно попало на сгоревшую часть снимка. Тогда обратились к голограмме. Осветили ее лучом лазера и увидели всю группу лиц, включая и то лицо, которое требовалось опознать. Голограмма оказалась надежнее фотографии.

Эта ситуация придумана для того, чтобы проиллюстрировать следующий факт: если уничтожение части поверхности фотографии (или, например, страницы книги) обязательно приводит к потере какой-то информации, то уничтожение части поверхности голограммы к этому не приводит. Ведь информация о любой точке объекта «записывается» на всей площади голограммы, что, кстати говоря, хорошо видно на рис. 28, *а*. Голограмма восстанавливает объектную световую волну, поэтому размеры работающей площади голограммы будут определять размеры площади восстанавливаемого волнового фронта. Сокращение работающей площади голограммы приводит к сокращению площади волнового фронта — примерно как если бы мы смотрели на некую удаленную сцену через постепенно сужающееся окошко. Сравнительно небольшие сокращения площади восстанавливаемого волнового фронта вообще не отразятся на качестве считываемого изображения, более существенные сокращения приведут к ухудшению четкости изображения. В частности, на качество изображения не влияют различные царапины и пятна, которые могут появиться на голограмме; при просвечивании голограммы считывающим световым пучком они становятся попросту невидимыми. Таким образом, запись на голограмму оказывается *весьма надежным способом хранения информации*. Возможно, что в будущем человечество будет хранить особо ценную информацию именно в виде голограмм (голограмм рукописей, чертежей, уникальных скульптур и т. д.).

Расшифровать записанную на плоской голограмме интерференционную картину может лишь когерентная считывающая волна с точно таким же фронтом, какой имела опорная волна, использовавшаяся на этапе записи голограммы. Значит, форма фронта опорной волны есть тот ключ, без которого нельзя прочитать голограмму. Если форма фронта опорной волны неизвестна (а при необходимости ее можно сделать достаточно своеобразной), то даже самые опытные дешифровальщики не смогут расшифровать голограмму.

Можно ли на одну фотопластинку записать несколько фотографических изображений? В принципе, можно. Только

вряд ли кто захочет пользоваться такими фотографиями. Точно так же не имеет смысла пробовать совмещать друг с другом несколько страниц текста. Голография снимает эти ограничения, внося тем самым очередную поправку в наши устоявшиеся представления. На одну и ту же голограмму можно записать много сцен (много интерференционных картин) и считывать их затем независимо друг от друга. Пусть, для простоты, опорная волна является плоской. Будем записывать на одну и ту же голограмму разные сцены, меняя всякий раз углы, под которыми опорная волна падает на голограмму. Для последующего считывания той или иной сцены надо обеспечить лишь соответствующую ориентацию голограммы в считывающем световом пучке. Специалисты утверждают, что на одной голограмме площадью 100 см² можно записать (при условии последующего уверенного считывания) по крайней мере целый том Большой Советской Энциклопедии. Это говорит об *исключительно высокой информационной емкости голограммы*.

На фотографии изображен прыгун в воду, как бы застывший в воздухе в нескольких метрах над водой. На другой фотографии под увеличением снята для некоторого момента времени сцена, заполненная плавающими в воздухе пылинками; пылинки застыли в положениях, в которых их застал момент съемки. Мы говорим, что фотография способна «остановить мгновение». Предположим, однако, что мы хотим знать, например, как в данный момент прыгун держит левую руку. Но на фотографии эта рука не видна. Хотелось бы поподробнее разглядеть пылинки на заднем плане сцены, однако на фотографии они получились нерезкими. И тут уже, очевидно, ничего не поправишь. Теперь представим, что вместо фотографии прыгуна и сцены с пылинками мы имеем соответствующие голограммы, снятые в некоторый момент времени. При считывании каждой из голограмм в непрерывном лазерном свете будет все время воспроизводиться световая волна, копирующая волну, отраженную от объекта наблюдения в момент съемки. Теперь мы можем наблюдать прыгуна с разных положений, можем менять настройку микроскопа, рассматривая то ближние, то дальние пылинки. По сравнению с фотографией голограмма, «останавливая мгновение», позволяет получить значительно более полную информацию об объекте в момент его съемки. Она непрерывно воспроизводит структуру оптических полей, в действительности существовавшую лишь для какого-то момента вре-

мени. Вот в этой способности воссоздавать световые волны, копирующие некогда «замороженную» волну, и заключается основное, чем интересна и перспективна голография. Отсюда и все ее уникальные возможности.

Впрочем, голография идет даже дальше. Она может воссоздавать оптические поля с определенной формой волнового фронта, не прибегая к образцам для копирования, а просто при помощи ЭВМ.

Зачем нужны голограммы, созданные при помощи ЭВМ? Поскольку голограмма есть в конечном счете некий «рисунок», то ее, в принципе, можно изготовить *искусственно.* Так как рисунок этот очень сложный, то для его изготовления необходимо обратиться за помощью к современным ЭВМ. Такие голограммы действительно изготавливаются. В этом случае воссоздаваемая голограммой световая волна уже не является копией волны, некогда отраженной объектом. Объект отсутствует не только на этапе считывания голограммы, но также и на этапе ее создания. Он вообще отсутствует.

Подобные голограммы полезны в архитектуре и при проектировании различных технических устройств. Они дают возможность наглядно представить, как будет выглядеть разрабатываемая новая модель или проектируемое здание. Другое применение таких голограмм — создание плоских аналогов оптических элементов, выполняющих то или иное преобразование фронта световой волны. Еще одно применение — наглядное представление результатов различных расчетов в виде объемных (трехмерных) графиков.

Вопросы создания искусственных голограмм при помощи ЭВМ составляют содержание специального направления в голографии, называемого *цифровой голографией.* Важность этого направления отнюдь не исчерпывается получением голографических изображений объектов, не существующих в действительности. Чтобы совершенствовать качество голографических изображений, необходимо изучать микроструктуру интерференционного «рисунка», фиксируемого на голограмме, необходимо уметь математически анализировать и моделировать эту микроструктуру. Всем этим и занимается цифровая голография.

Насколько глубоко проникнет голография в окружающий нас мир? Уже сегодня методы голографии широко применяются на практике для хранения и обработки информации, для осуществления различных форм контроля. Об этом мы подробно поговорим в свое время. Здесь же нам

хотелось бы коснуться той роли, какую голография играет в нашей повседневной жизни.

В Ленинграде при Государственном оптическом институте имени С. И. Вавилова организован музей голографии, в котором имеются отражательные объемные голограммы с изображением ряда скульптур и изделий из металла, хранящихся в Эрмитаже. В конце 70-х годов в Москве на ВДНХ можно было присутствовать на открытии необычной экспозиции. Вниманию посетителей предлагались голограммы произведений скульптуры, живописи, ювелирного искусства. Были там и голограммы некоторых драгоценных камней из Алмазного фонда СССР. Все, кто видел такие голограммы, отмечают, что создается впечатление, будто перед вами находятся подлинные объекты. Подобные экспозиции на различных выставках и в музеях устраиваются в наши дни во многих странах. Возможно, что благодаря голограммам жители любого города смогут в недалеком будущем знакомиться с шедеврами отечественного и мирового изобразительного искусства, с уникальными археологическими находками. Когда-нибудь музеи с такими голограммами будут создаваться в каждой школе.

Уже теперь появляются книги, в которых отдельные иллюстрации представляют собой отражательные объемные голограммы. По-видимому, такие голограммы-иллюстрации будут особенно полезны в учебных пособиях. Предпринимаются попытки использовать голограммы в детских играх, рекламе, оформлении интерьеров, сценических декорациях.

В Советском Союзе успешно решается проблема создания голографического кино. На XII конгрессе Международного союза технических кинематографических ассоциаций, проходившем в Москве в октябре 1976 г., демонстрировался короткометражный голографический кинофильм. Правда, он длился всего полминуты и демонстрировался на небольшом экране размерами 60×80 см, перед которым могли находиться одновременно только четыре зрителя (остальным голографическое изображение не было видно). Но тем не менее этот фильм подтвердил практическую возможность создания голографического кино. Об этой необычной демонстрации газета «Правда» писала в те дни: «...Когда погас свет, за небольшим полупрозрачным экраном неожиданно появилась девушка в русском наряде. Не обращая внимания на зрителей, она двигалась, играла драгоценностями, помещала их в сверкающий сосуд.

Изображение было необычным. Впервые оно существовало самостоятельно, как бы вне экрана, за растворившейся в темноте зала стеклянной «перегородкой». И это казалось сказкой: на наших глазах прерывалась ставшая привычной связь изображения с экраном».

Фильм, о котором мы рассказываем, был создан во Всесоюзном научно-исследовательском кинофотоинституте коллективом сотрудников, возглавляемым профессором В. Г. Комаром. Фильм записан на пленке шириной 70 мм. Кадры пленки представляют собой плоские голограммы, сменяющие друг друга с частотой 30 Гц. Съемка производилась с использованием импульсного лазера на рубине. Каждый голографический кадр снимался одним лазерным импульсом длительностью 50 нс.

В настоящее время ведутся исследования по дальнейшему развитию голографического кино. Разрабатывается система с цветным изображением и экраном, рассчитанным на 400 зрителей. Возможно, что еще в нынешнем веке голографическое кино получит широкое распространение.

Значительно более сложной представляется проблема создания голографического телевидения. Дело в том, что голограмма содержит в себе примерно в сто тысяч раз больше информации, чем обычное изображение на телевизионном экране. Чтобы передать столько информации по телевизионному каналу, требуется несколько часов. В то же время для создания эффекта непрерывного движения необходимо передавать 30 голограмм в секунду. Отсюда видно, что «в лоб» проблема голографического телевидения не решается. Поэтому активно ищутся различные обходные пути. Будущее покажет, насколько успешными окажутся эти поиски.

Во всяком случае, можно не сомневаться, что в будущем голография достаточно глубоко проникнет в нашу жизнь. До сих пор человек проявлял свою власть фактически лишь над одной формой материи — *веществом*. Его он научился сохранять, обрабатывать, видоизменять. Другая же форма материи — *поле* — в силу своей изменчивости, динамичности, «неуловимости» оставалась в существенной мере неподвластной человеку. Как законсервировать, хранить, видоизменять электромагнитное поле? Ответ на этот вопрос человек нашел лишь недавно. Он нашел его в процессе создания и развития методов голографии. Неудивительно, что первое знакомство с голографическими изображениями неизбежно оставляет сильное впечатление. Понятно и то, что многие эффекты, получаемые при помощи

голографии, кажутся на первый взгляд каким-то чудом. Просто мы еще не привыкли, мы еще только учимся властвовать над электромагнитным полем.

Справка. К истории возникновения и развития голографии. Примечательно, что идеи голографии, ее принципы и методы начали формироваться еще до создания лазера. В принципе идея голографического метода получения изображений была выдвинута и экспериментально проверена польским физиком М. Вольфке. В 1920 г. он опубликовал работу «О возможности оптического изображения молекулярной решетки». В работе было показано, что, используя дифракцию рентгеновских лучей на кристалле, можно получить оптическое изображение кристаллической решетки. К сожалению, работа М. Вольфке не нашла в свое время отклика у физиков. М. Вольфке выступил как предвестник голографии, не понятый и не поддержанный современниками.

Идеи и принципы голографии были заново сформулированы в 1948 г. английским ученым Д. Габором, не знакомым в то время с работой Вольфке. Д. Габор пришел к голографии, занимаясь весьма практической задачей: он изучал возможности повышения разрешающей способности электронного микроскопа. В своей работе, названной «Новый принцип микроскопии», Габор сформулировал двухступенчатый метод получения голографических изображений и изложил результаты своих исследований. Он же ввел термин «голограмма». Термин «голография» появился позднее; Габор называл описанный им метод «методом восстановления волнового фронта».

Запись голограммы объекта Д. Габор производил электронным пучком, используя волновые свойства электронов. В качестве объекта он взял тонкий транспарант. Электронный пучок, проходя сквозь транспарант, частично рассеивался. Рассеянная часть пучка интерферировала с той частью пучка, которая не испытала рассеяния (Габор называл ее когерентным фоном); в результате возникала интерференционная картина на голограмме. Схема записи голограммы по Габору показана в упрощенном виде на рис. 34, *а*. Восстановление волнового фронта (считывание голограммы) Габор производил оптическим излучением, используя в качестве источника света дуговую ртутную лампу с монохроматором. Несмотря на невысокую степень когерентности света, Габору все же удалось получить изображение объекта. Правда, оно не отличалось хорошим качеством, а главное, у него был двойник.

Как отмечал Габор, идея метода голографии в электронной микроскопии как двухступенчатого процесса, «в котором предмет регистрируется с помощью пучка электронов, а восстанавливается с помощью светового пучка», возникла под влиянием идей английского физика У. Брэгга, изложенных в 1942 г. в работе «Рентгеновский микроскоп». В этой работе рассматривалась возможность визуализации кристаллической решетки с помощью дифракции на интерференционной картине, полученной в рентгеновских лучах. Надо сказать, что в 40-е и 50-е годы очень немногие отнеслись серьезно к исследованиям Габора. Полагали, что его метод может иметь значение лишь для электронной и рентгеновской микроскопии. Только в 1971 г. Д. Габор был удостоен Нобелевской премии по физике за свои исследования по голографии.

Через 12 лет после работы Д. Габора «Новый принцип микроскопии» появился источник когерентного света — лазер. И сразу же возродился интерес к голографии. Теперь не только считывание, но и запись голограммы стали делать оптическим излучением, используя схему Габора. Несмотря на применение лазера, восстанавливаемое изображение имело двойника, от которого никак не удавалось избавиться. В 1961 г.

американские физики Э. Лейт и Ю. Упатниекс, изучив габоровскую схему, пришли к выводу, что когерентный фон играет, по сути дела, роль опорной волны. Они предложили отделить эту волну от волны, отраженной объектом, с тем, чтобы указанные волны пересекались и интерферировали только на фотопластинке. Предложенный Э. Лейтом и Ю. Упатниексом двухлучевой метод записи голограммы (с использованием объектного и опорного световых пучков, распространяющихся под углом друг к другу) получил широкое применение. Схематически этот метод показан на рис. 34, *б*. Читатель, наверное, догадался, что именно

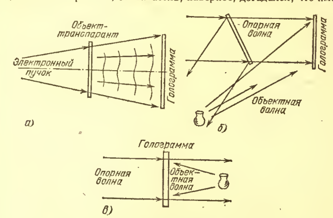


Рис. 34. Схемы записи голограммы: *а*) по Габору, *б*) по Лейту и Упатниексу, *в*) по Денисюку.

этот метод мы рассматривали ранее, когда обсуждали принципы оптической голографии.

В 1962 г. советский физик Ю. Н. Денисюк (ныне член-корреспондент АН СССР) предложил объемные голограммы на основе толстослойных фотоэмульсий. Он же разработал метод записи этих голограмм во встречных световых пучках. Схема записи по методу Ю. Н. Денисюка показана на рис. 34, *в*. Лазерный пучок сначала проходит через фотоэмульсию; это есть прямой пучок, он играет роль опорной волны. За фотоэмульсией располагается объект. Он отражает часть прошедшего через фотоэмульсию пучка назад, к фотоэмульсии; это есть встречный пучок, он является объектной волной. При считывании голограммы световой пучок падает на нее так же, как падал опорный пучок на этапе записи. В результате брэгговского отражения часть пучка отражается назад, формируя волну, являющуюся копией объектной волны. Наблюдатель видит мнимое изображение объекта за голограммой — там, где во время записи находился сам объект.

Отражательные объемные голограммы Ю. Н. Денисюка, считываемые в солнечном свете и свете электрической лампы, явились плодом многолетних исследований ученого, начатых им еще до появления работы Д. Габора и задолго до создания лазеров. Как отмечал Ю. Н. Денисюк, исходным моментом для него послужил метод цветной фотографии, разработанный еще в 1892 г. французским физиком Г. Липпманом.

ЧТО ТАКОЕ НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИКА

Изменяются ли физические характеристики вещества под действием светового пучка? На этот вопрос обычно отвечают отрицательно. Мы привыкли к тому, что характеристики вещества не изменяются, когда через это вещество распространяется световой пучок. В частности, обычно мы полагаем, что показатель преломления среды не зависит от интенсивности преломляющегося светового пучка.

Световые поля обычных (нелазерных) источников света характеризуются электрической напряженностью порядка 1—100 В/см. Это намного меньше напряженности полей в атомах и молекулах вещества (10^8—10^{10} В/см). Вполне естественно, что при таком «соотношении сил» световая волна не может сколько-нибудь заметно повлиять на связанные с внутриатомными полями физические характеристики вещества.

С появлением лазеров ситуация, однако, резко изменилась. Лазеры позволяют получать световые поля напряженностью до 10^7—10^8 В/см. Теперь напряженность поля световой волны оказывается сопоставимой с напряженностью полей в атомах и молекулах. А это приводит к тому, что при прохождении такой световой волны через вещество его характеристики *изменяются.* Подчеркнем, что изменение имеет *обратимый* характер: как только прекращается облучение вещества лазерным излучением, характеристики вещества становятся прежними — такими, какими они были до облучения.

Хорошим примером может служить изменение прозрачности вещества под воздействием лазерного луча. Это происходит, например, в просветляющихся фильтрах, с которыми читатель познакомился во втором рассказе. Напомним, что под действием интенсивного света непрозрачный вначале фильтр становится прозрачным (просветляется); после прекращения действия света фильтр быстро возвращается в исходное состояние. Можно наблюдать

поистине удивительную картину, когда мощный лазерный импульс, падая на непрозрачную пластинку или кювету с жидкостью, практически моментально просветляет ее и проскакивает насквозь, после чего пластинка (жидкость) тут же снова становится непрозрачной. Это похоже на то, как если бы световой импульс «открыл в стенке дверцу», прошмыгнул в нее и тут же прикрыл «дверцу» за собой.

Не менее удивительно и явление затемнения среды, также рассматривавшееся во втором рассказе. Здесь все происходит наоборот: пластинка, бывшая вначале прозрачной, мутнеет при облучении ее светом. Чем больше интенсивность света, тем сильнее мутнеет такая пластинка. Она может стать вообще непрозрачной. Но как только облучение светом прекращается, прозрачность пластинки сразу же восстанавливается.

В явлениях просветления и затемнения среды обнаруживает зависимость от интенсивности света такая характеристика вещества, как степень его прозрачности или, говоря строже, его коэффициент поглощения света. Физику обоих явлений мы уже обсуждали. Остается лишь отметить, что эти и подобные им явления (когда те или иные характеристики вещества обратимым образом изменяются под действием света, причем тем сильнее, чем выше интенсивность света) изучает особый раздел современной оптики, называемый *нелинейной оптикой*.

Почему оптика может быть «нелинейной»? Читатель, наверное, помнит, что под действием внешнего электрического поля диэлектрики *поляризуются*: поле вызывает смещение электронных оболочек атомов относительно ядер, в результате чего атомы приобретают электрический дипольный момент. Степень поляризации диэлектрика описывают физической величиной, представляющей собой электрический дипольный момент единицы объема среды, наведенный внешним полем,— поляризацией P. Она связана с напряженностью E поляризующего электрического поля простым соотношением: $P = \alpha E$. Здесь α — одна из физических характеристик диэлектрика; ее называют диэлектрической восприимчивостью. Поляризацию P можно рассматривать как своеобразный *отклик* среды в ответ на *внешнее воздействие*, в качестве которого здесь выступает внешнее электрическое поле. Чтобы поляризовать диэлектрик, его, например, помещают между пластинами заряженного конденсатора. Можно поступить и иначе: пропустить сквозь диэлектрик световой пучок. В последнем случае роль внешнего воздействия будет выполнять элект-

рическое поле световой волны, распространяющейся по диэлектрику. Именно этот случай нас и интересует.

Допустим, интенсивность световой волны невелика и можно полагать, что диэлектрическая восприимчивость α (как и другие физические характеристики диэлектрика) не зависит от интенсивности света. В этом случае описываемая соотношением $P=\alpha E$ зависимость поляризации диэлектрика от электрической напряженности светового поля является *прямо пропорциональной* или, иначе, *линейной*. Можно сказать, что отклик среды (поляризация диэлектрика) на внешнее воздействие (на напряженность поля световой волны) является в рассматриваемом случае линейным. Такая ситуация характерна для обычных (нелазерных) источников света. Поэтому долазерную оптику можно было бы назвать «линейной оптикой».

Теперь направим на диэлектрик мощный лазерный луч. Мы уже знаем, что при этом характеристики диэлектрика изменятся — теперь они будут зависеть от напряженности поля световой волны (а значит, и от интенсивности света). В частности, и диэлектрическая восприимчивость будет теперь не постоянной для данного диэлектрика величиной, а некоторой функцией напряженности поля. Во многих случаях эту функцию можно представить очень просто: $\alpha(E)=\alpha_0+\alpha_1 E$, где α_0 и α_1 — некие постоянные параметры. В результате поляризация диэлектрика оказывается зависящей от напряженности светового поля по следующему закону: $P=\alpha(E)E=\alpha_0 E+\alpha_1 E^2$. Перед нами квадратичный закон. Но это в данном случае не главное. Главное то, что зависимость P от E теперь уже не является линейной. При воздействии на среду достаточно интенсивным световым пучком ее отклик на это воздействие оказывается *нелинейным*. Поэтому говорят о «нелинейной поляризации» среды. Отсюда же происходят термины «нелинейная оптика», «нелинейно-оптические явления».

С некоторыми нелинейно-оптическими явлениями — явлениями просветления и затемнения среды — читатель уже познакомился. О других нелинейно-оптических явлениях мы расскажем ниже. Заметим, что все они обусловлены, в конечном счете, нелинейностью поляризации среды, проявляющейся при прохождении через среду мощного лазерного излучения.

Могут ли световые волны взаимодействовать друг с другом? Хорошо известно, что два световых пучка в воздухе свободно проходят один сквозь другой, как бы «не замечая» друг друга. При этом не изменяются ни направление рас-

пространения пучка, ни его расходимость, ни его частота. Мы привыкли к тому, что точно так же ведут себя световые пучки, встречаясь друг с другом в твердых и жидких прозрачных диэлектриках. Однако это верно лишь для доласерной (линейной) оптики. В нелинейной оптике мы имеем дело с принципиально иной ситуацией. Если интенсивность света достаточно велика для того, чтобы проявлялась нелинейность поляризации среды, то в такой среде можно наблюдать *взаимодействие световых волн*. В результате этого взаимодействия могут возникать *новые* световые волны. Например, взаимодействие световых волн, имеющих частоты ν_1 и ν_2, может приводить к возникновению световых волн на частотах $2\nu_1$, $2\nu_2$, $\nu_1+\nu_2$, $\nu_1-\nu_2$. Покажем это, используя максимум упрощений.

Пусть нелинейная поляризация среды описывается квадратичным выражением $\alpha_1 E^2$. В это выражение надо подставить напряженность светового поля, определяемого суммой двух световых волн — с частотой ν_1 и ν_2 соответственно. Представим суммарное световое поле в упрощенном виде: $E_0(\cos 2\pi\nu_1 t+\cos 2\pi\nu_2 t)$. Возведя в квадрат стоящую в скобках сумму косинусов и воспользовавшись тригонометрическими формулами $2\cos^2\beta=1+\cos 2\beta$ и $2\cos\beta\cos\gamma=\cos(\beta+\gamma)+\cos(\beta-\gamma)$, мы получим выражение для поляризации среды, содержащее слагаемые (косинусы) с частотами $2\nu_1$, $2\nu_2$, $\nu_1+\nu_2$, $\nu_1-\nu_2$. Следовательно, в среде возникают волны поляризации на таких частотах. Каждую волну поляризации можно уподобить бегущей по среде своеобразной «антенне», которая при определенных условиях способна излучить новую световую волну — на той же частоте, какую имеет волна поляризации. Таким образом, происходящее в среде с нелинейной поляризацией взаимодействие световых волн с частотами ν_1 и ν_2 может приводить к появлению новых (переизлученных) световых волн на частотах $2\nu_1$, $2\nu_2$, $\nu_1+\nu_2$, $\nu_1-\nu_2$.

Предположим, что в среде с нелинейной поляризацией распространяется одна световая волна; пусть ее частота есть ν. В данном случае можно говорить о том, что взаимодействуют две волны на одной и той же частоте или, физически вернее, о том, что световая волна частоты ν взаимодействует сама с собой. Из предыдущих рассуждений следует, что в рассматриваемом случае может быть переизлучена световая волна на частоте 2ν, т. е. может наблюдаться удвоение частоты световой волны. Это нелинейно-оптическое явление широко используется в лазерной технике, поэтому расскажем о нем немного подробнее.

Как на практике можно удвоить частоту лазерного излучения? Чтобы происходила передача энергии от исходной световой волны частоты ν к переизлученной световой волне частоты 2ν, требуется выполнение вполне естественного условия: скорости указанных световых волн в данной среде должны совпадать. Мы назвали это условие естественным, имея в виду простую аналогию: нельзя на бегу передавать непрерывно что-либо партнеру, если он не бежит с такой же, как и вы, скоростью. Напомним, что скорость света в среде равна скорости света в вакууме, деленной на показатель преломления среды. Следовательно, данное условие означает, что должны совпадать показатели преломления среды n_ν и $n_{2\nu}$ для рассматриваемых световых волн. Показатель преломления изменяется с частотой света; обычно он растет с увеличением частоты. Поэтому условие $n_\nu=n_{2\nu}$ может показаться на первый взгляд невыполнимым. Однако это не так. Оказывается, что данное условие может быть выполнено, если воспользоваться особенностями прохождения света через *кристаллы*.

Расскажем хотя бы вкратце об этих особенностях. Прежде всего заметим, что в кристалле существует особое направление, называемое *оптической осью* кристалла. Для всех направлений, составляющих с оптической осью один и тот же угол, свойства кристалла одинаковы. Плоскость, проходящую через оптическую ось и направление распространения световой волны, называют плоскостью главного сечения. Особенности распространения света внутри кристалла состоят в том, что световая волна, попадая в кристалл, превращается в две волны, характеризующиеся разными скоростями и поляризациями. Одну из этих волн принято называть *обыкновенной*, а другую — *необыкновенной*. Первая поляризована перпендикулярно к плоскости главного сечения, а вторая поляризована в этой плоскости. Кстати говоря, мы уже встречались с этими световыми волнами, когда во втором рассказе говорили об использовании явления двойного лучепреломления в электрооптических дефлекторах. Световые лучи на рис. 10, проходящие сквозь кристаллы не отклоняясь, соответствуют обыкновенной световой волне, а отклоняющиеся световые лучи отвечают необыкновенной волне.

Показатель преломления для обыкновенной волны не зависит от направления ее распространения в кристалле. Будем обозначать этот показатель преломления через n^o; индекс «о» есть начальная буква английского слова ordi-

nary — «обыкновенный». Что же касается необыкновенной световой волны, то ее показатель преломления зависит от угла θ между направлением распространения волны и оптической осью кристалла. Поэтому будем записывать этот показатель преломления как функцию от угла θ: $n^e(\theta)$. Индекс «е» есть начальная буква английского слова extraordinary — «необыкновенный». Не будем выписывать формулы, а просто нарисуем график зависимости n^e от угла; эта зависимость изображается в виде эллипса, показанного на рис. 35, *а*. Здесь OA — оптическая ось кристалла, длина отрезка OA_1 есть значение функции $n^e(\theta)$

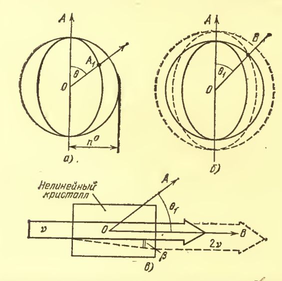


Рис. 35. Удвоение частоты света в нелинейном кристалле.

для угла θ между OA и OA_1. На том же рисунке изображена окружность радиуса n^o (для обыкновенной волны). Из рисунка видно, что в направлении оптической оси (когда $\theta=0$) показатели преломления обыкновенной и необыкновенной волн, а значит, и их скорости совпадают. В направлении же, перпендикулярном оптической оси (когда $\theta=90°$), показатели преломления (и скорости) указанных волн различаются наиболее сильно.

Теперь мы можем вернуться к вопросу об удвоении частоты света. На рис. 35, *б* показаны сплошными линиями кривые для показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волн некоторой частоты ν. На том же

рисунке штриховыми линиями показаны соответствующие кривые для волн частоты 2ν. Как и следовало ожидать, с увеличением частоты света показатель преломления растет. Можно, однако, видеть, что существуют направления,— например направление *OB*,— вдоль которых выполняется равенство: $n_{\nu}^{o}=n_{2\nu}^{e}(\theta_1)$. Напомним, что именно это условие требуется для того, чтобы происходила передача энергии от исходной световой волны частоты ν к переизлученной световой волне частоты 2ν. Рассматриваемое условие называют *условием волнового синхронизма*. Соответственно говорят о направлении *OB* как о направлении синхронизма, а об угле θ_1 (угле между направлением синхронизма и оптической осью кристалла) как об угле синхронизма. Итак, в направлении синхронизма показатель преломления для обыкновенной световой волны частоты ν равен показателю преломления для необыкновенной волны частоты 2ν.

После сделанных замечаний нетрудно сообразить, как можно *практически* осуществить удвоение частоты лазерного излучения. Для этого надо взять подходящий кристалл и вырезать образец таким образом, чтобы падающий на него нормально лазерный луч частоты ν образовывал угол синхронизма θ_1 с оптической осью кристалла *OA* (рис. 35, *в*). Надо также позаботиться о поляризации исходного лазерного пучка: он должен быть поляризован перпендикулярно плоскости главного сечения (перпендикулярно к плоскости рисунка) — с тем, чтобы сыграть в кристалле роль обыкновенной световой волны. Вот, собственно говоря, и все. Благодаря нелинейности поляризации в кристалле возникнет световая волна частоты 2ν, поляризованная в плоскости главного сечения. Световой пучок частоты 2ν показан на рис. 35, *в* штриховыми линиями. Двойное лучепреломление приводит к сносу этого пучка в поперечном направлении; снос характеризуется углом β. Снос отсутствует (β=0), когда угол синхронизма равен 90°.

Вот уже более пятнадцати лет развивается новое научно-техническое направление, связанное с *умножением оптических частот* (применяется также термин «генерация оптических гармоник»: второй гармоники, третьей, четвертой и т. д.— в зависимости от того, во сколько раз умножается частота исходного лазерного излучения). Налажено промышленное производство различных типов удвоителей оптических частот, позволяющих преобразовывать во вторую гармонику до 30—50% мощности исход-

ного светового пучка. Эти преобразователи используют излучение лазеров на гранате с неодимом. В качестве кристаллов с нелинейной поляризацией применяют кристаллы дигидрофосфата калия (KH_2PO_4), называемые условно кристаллами KDP, ниобата лития ($LiNbO_3$), ниобата бария-натрия ($Ba_2NaNb_5O_{15}$) и др. Их обычно называют нелинейными кристаллами.

Умножение оптических частот возможно лишь тогда, когда используется лазерное излучение. Здесь принципиально важна *когерентность* излучения. Ведь только благодаря высокой когерентности излучения лазеров можно достаточно сильно сконцентрировать световую мощность в каком-то определенном направлении в пространстве и притом в очень узком интервале частот. В связи с этим важно обратить внимание на то, что условие синхронизма относится всякий раз к определенной частоте света и к определенным направлениям распространения света в данном кристалле. Если, например, изменится частота исходного лазерного пучка, то изменится и угол синхронизма; иначе говоря, станут другими направления синхронизма. Поэтому очень важно, чтобы световой пучок был не только интенсивным, но и при этом остронаправленным и монохроматическим.

Как работает параметрический генератор света? Мы уже видели, что при взаимодействии световых волн на частотах ν_1 и ν_2 в среде с нелинейной поляризацией может появиться, в частности, световая волна на разностной частоте $\nu_1-\nu_2$. При этом должно выполняться соответствующее условие волнового синхронизма (мы не будем его рассматривать), что оказывается возможным лишь для определенных направлений в данном нелинейном кристалле (направлений синхронизма).

Поместим нелинейный кристалл между двумя зеркалами, образующими оптический резонатор. Ориентируем кристалл внутри резонатора так, чтобы направление синхронизма (для частот ν_2 и $\nu_1-\nu_2$) совпадало с осью резонатора. Введем в такой резонатор вдоль его оси когерентную волну на частоте ν_1, так называемую волну накачки. Эта световая волна должна быть достаточно интенсивной, чтобы могла проявиться нелинейность поляризации кристалла. Кроме того, в соответствии с условием синхронизма волна накачки должна быть определенным образом поляризована. Если все эти требования выполнены, в нелинейном кристалле будут происходить процессы, которые можно представить следующим образом. Мощная волна

накачки на частоте ν_1 взаимодействует со слабым сигналом частоты ν_2, который неизбежно присутствует в шуме, связанном с различными самопроизвольными переходами в кристалле (в шуме присутствуют сигналы практически на любых частотах). В результате этого взаимодействия переизлучается новая световая волна — волна на разностной частоте $\nu_1-\nu_2$. Взаимодействие волны накачки с этой новой волной приводит, в свою очередь, к переизлучению волны на разностной частоте $\nu_1-(\nu_1-\nu_2)$, т. е. на частоте ν_2. Таким образом, лазерный пучок частоты ν_1 преобразуется в нелинейном кристалле в два световых пучка — на частотах $\nu_1-\nu_2$ и ν_2. Это есть явление *параметрической генерации света* (термин взят из радиофизики). В существующих параметрических генераторах света удается преобразовать в новые световые волны до 40—50% мощности волны накачки.

Обратим внимание читателя на то, что сумма частот двух новых световых волн, рождающихся в параметрическом генераторе света, равна частоте волны накачки. Можно сказать, что в данном случае происходит «разбиение» исходной частоты ν_1 на две составляющие: ν_2 и $\nu_1-\nu_2$. Выбор конкретного разбиения (выбор конкретной частоты ν_2), разумеется, не случаен. Он зависит от того, как именно ориентирован в том или ином конкретном случае внутри резонатора нелинейный кристалл. Генерируются такие частоты ν_2 и $\nu_1-\nu_2$, для которых направление синхронизма *совпадает* с осью резонатора.

Отсюда видно, что, изменяя ориентацию нелинейного кристалла внутри резонатора параметрического генератора света, можно управлять «разбиением» исходной частоты (частоты волны накачки) на составляющие частоты. Тем самым можно плавно и целенаправленно *перестраивать* частоту ν_2 (а значит, и частоту $\nu_1-\nu_2$). С помощью специального устройства определенным образом слегка *поворачивают* нелинейный кристалл внутри резонатора, плавно изменяя угол между оптической осью кристалла и осью резонатора. При каждом конкретном значении этого угла будет генерироваться именно та комбинация частот ν_2 и $\nu_1-\nu_2$, для которой направление синхронизма совпадает с направлением оси резонатора.

Существуют различные оптические схемы параметрических генераторов света. Одна из них приведена на рис. 36 (устройство для поворачивания нелинейного кристалла здесь не показано). Схема не требует особых пояснений. Заметим только, что оба зеркала резонатора прозрачны

на частоте волны накачки. Для более низких частот левое зеркало является полностью отражающим, а правое характеризуется некоторой прозрачностью. В данной схеме генерируются одновременно обе световые волны — как на частоте ν_2, так и на частоте $\nu_1 - \nu_2$. Используются также схемы, где генерируется только одна из этих волн; для другой волны специально создаются высокие потери, приводящие к срыву ее генерации.

ν_1 ν_2 $\nu_1 - \nu_2$
Нелинейный кристалл

Рис. 36. Параметрический генератор света.

В настоящее время достаточно широко применяют параметрические генераторы света на кристалле ниобата лития. Они накачиваются излучением лазера на гранате с неодимом или второй гармоникой излучения этого лазера. При накачке второй гармоникой (длина волны излучения накачки 0,53 мкм) удается осуществлять плавную перестройку длины волны когерентного света в диапазоне от 0,55 до примерно 3 мкм.

Что такое самофокусировка света? Известно, что по мере распространения в прозрачной среде световой пучок постепенно расширяется, его интенсивность падает. Такая картина всегда наблюдается в линейной оптике. В нелинейной же оптике картина распространения светового пучка в среде может выглядеть совсем иначе. Если интенсивность лазерного пучка превысит некоторое определенное для данной среды значение (около 10 кВт для органических жидкостей, 1—10 Вт для некоторых кристаллов и стекол), то такой пучок, распространяясь в среде, будет не расширяться, а наоборот, *стягиваться*, превращаясь в очень тонкую световую «нить».

Это удивительное явление называют *самофокусировкой* света, так как оно напоминает фокусировку светового пучка обычной линзой.

В самых общих чертах самофокусировку света можно объяснить довольно просто. Дело в том, что показатель преломления среды с нелинейной поляризацией зависит от интенсивности света, распространяющегося по среде. Допустим, что показатель преломления растет с увеличением интенсивности света. Тогда вблизи оси лазерного пучка, где интенсивность наибольшая, будет наибольшим и показатель преломления. По мере приближения к боковой поверхности пучка показатель преломления будет

постепенно уменьшаться. Известно, что в оптически неоднородной среде световые лучи искривляются таким образом, что их траектория всегда оказывается обращенной своей выпуклостью в сторону с меньшим значением показателя преломления (этим объясняются, кстати говоря, оптические миражи). Значит, периферийные световые лучи в лазерном пучке будут в данном случае изгибаться, приближаясь к оси пучка (рис. 37). В результате световой пучок будет как бы фокусироваться. Это и приводит, в конечном счете, к стягиванию его в тонкую световую нить.

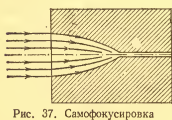


Рис. 37. Самофокусировка света.

Как и зачем обращают волновой фронт лазерного пучка? Существуют лазеры, генерирующие излучение с почти плоским волновым фронтом. К сожалению, это излучение имеет относительно низкую интенсивность. Казалось бы, беда невелика. Для повышения интенсивности излучения надо пропустить лазерный луч сквозь каскад квантовых оптических усилителей — активных элементов, в которых за счет накачки обеспечена инверсная населенность уровней активных центров. Однако при этом заметно ухудшится когерентность луча. Из-за неоднородности свойств материала активных элементов, возникающих в них деформаций и ряда других факторов произойдет искажение волнового фронта лазерного пучка. Плоский вначале волновой фронт становится уже не плоским, а произвольным образом искаженным. Чем больше усилителей в каскаде на пути лазерного пучка, тем будет выше интенсивность пучка, но зато будут сильнее и искажения волнового фронта. Перед нами довольно распространенная ситуация: количественный выигрыш достигается ценой потери качества.

Отметим, что искажения волнового фронта наблюдаются при распространении световых пучков по любым оптическим трактам. Оптический тракт может состоять из каскада усилителей, но может представлять собой и просто естественную среду (воздушную или водную), через которую передают оптические сигналы. В последнем случае искажения волнового фронта вызываются турбулентностями и неоднородностями, которые всегда имеются в любой естественной среде.

А нельзя ли получить количественный выигрыш без потери качества? Нельзя ли как-то исправлять искажения волнового фронта, накапливающиеся по мере распространения излучения по тому или иному оптическому тракту? Иначе говоря, нельзя ли соответствующим образом *корректировать* волновой фронт излучения? Положительный ответ на этот вопрос был найден недавно — всего каких-нибудь десять лет назад, когда было открыто явление *обращения волнового фронта* в нелинейных средах. Это открытие дало начало развитию нового научно-технического направления — так называемой *адаптивной оптики*.

Прежде всего объясним, что такое обращение волнового фронта. Предположим, что световой пучок с сильно искаженным фронтом отражается от обычного плоского зеркала. На рис. 38, *а* штриховой линией показано сечение такого фронта вблизи поверхности зеркала. Штриховые стрелки — это световые лучи, соответствующие изображенному фронту (напомним, что в каждой точке световой луч и поверхность волнового фронта взаимно перпендикулярны). При отражении от зеркала световые лучи изменяют свое направление в соответствии с законом отражения; отраженные лучи показаны на рисунке сплошными стрелками.

Рис. 38. *а*) Отражение от обычного зеркала. *б*) Отражение от адаптивного зеркала. *в*) «Нелинейное зеркало».

Теперь предположим, что вместо плоского зеркала используется совершенно необычное зеркало: форма его поверхности в точности копирует форму поверхности волнового фронта пучка, падающего на поверхность зеркала (рис. 38, *б*). Такое зеркало с гибкой поверхностью, которую можно «подстраивать» под форму падающего на зеркало волнового фронта, называют *адаптивным* (от слова «адаптироваться», что означает «приспосабливаться, подстраиваться»). При отражении от адаптивного зеркала каждый световой луч изменяет свое направление точно на 180°. В этом и состоит *обращение волнового фронта*. Обра-

щенный волновой фронт (фронт, отраженный от адаптивного зеркала) имеет такую же форму, что и фронт, падающий на поверхность зеркала, но распространяется в обратном направлении — уже не к зеркалу, а от зеркала. Ясно, что каждый отраженный зеркалом световой луч будет иметь такую же траекторию, какую имел соответствующий луч, падающий на поверхность зеркала. Допустим, что на адаптивное зеркало падают лучи, вышедшие из лазера и прошедшие через каскад оптических усилителей. Каждый отраженный адаптивным зеркалом луч вернется от зеркала через тот же каскад усилителей обратно к лазеру точно по такой же траектории, какую он описал ранее, распространяясь от лазера через усилители к зеркалу. А это означает, что, пройдя дважды через каскад усилителей (вперед и обратно), световой пучок будет иметь в итоге *тот же* волновой фронт, какой он имел, выходя из лазера. Обратив волновой фронт пучка, адаптивное зеркало выполнило тем самым необходимую корректировку, учитывающую искажения, вносимые каскадом усилителей. В результате мы получаем усиленное по мощности излучение, имеющее в то же время хороший (плоский) волновой фронт.

Однако, каким образом можно на практике создать адаптивное зеркало, форма поверхности которого учитывала бы искажения волнового фронта, накапливающиеся в конкретном оптическом тракте? Оказывается, что создать такое зеркало совсем нетрудно, если воспользоваться некоторыми нелинейно-оптическими явлениями. Дело в том, что нелинейная среда способна при определенных условиях обращать волновой фронт светового пучка, посылаемого в эту среду. Иначе говоря, нелинейная среда может работать как адаптивное зеркало. При этом нет нужды выявлять, каким именно искажениям подвергся волновой фронт пучка; «нелинейное адаптивное зеркало» *автоматически* учитывает эти искажения, поскольку каждый световой луч, попавший в объем нелинейной среды, выйдет из нее обратно по той же самой траектории, по какой он распространялся, входя в среду (рис. 38, *в*). Таким образом, происходит не просто корректировка, а *самокорректировка* волнового фронта. Заметим, что термин «нелинейное зеркало» условен, так как на самом деле здесь нет какой-либо отражающей поверхности; «отражение» совершается в объеме нелинейной среды.

Можно было бы указать несколько нелинейно-оптических явлений, позволяющих обращать волновой фронт.

Так, возможно обращение фронта при взаимодействии световых волн в среде с нелинейной поляризацией. Для обращения фронта можно воспользоваться также рассеянием световой волны на сжатиях и разрежениях, возникающих в среде при распространении по ней звуковых волн. В данном случае обычно говорят о рассеянии световых волн на звуковых волнах. Это рассеяние изучал академик Л. И. Мандельштам еще в 20-х годах нашего столетия; независимо от него в том же направлении работал французский физик Л. Бриллюэн. Поэтому рассеяние света на звуковых волнах в среде называют *рассеянием Мандельштама — Бриллюэна*. Расскажем о нем немного подробнее.

Попадая в среду, световая волна рассеивается на звуковых волнах, которые порождаются тепловым движением молекул среды. Если рассеяние происходит на звуковой волне, распространяющейся попутно со световой волной, частота рассеянного света оказывается меньше частоты исходной световой волны на величину, равную частоте звука; такой рассеянный свет принято называть «стоксовым компонентом» (по имени английского физика Дж. Стокса). При рассеянии на встречной звуковой волне частота рассеянного света увеличивается — возникает «антистоксов компонент».

При достаточно большой интенсивности света, падающего на среду, наблюдается так называемое *вынужденное* рассеяние Мандельштама — Бриллюэна. «Вынужденное» оно потому, что теперь световая волна рассеивается на звуковых волнах, которые она же сама и возбуждает в среде. Интенсивность «возбужденных» светом звуковых волн может стать значительной; в результате будет наблюдаться существенное усиление интенсивности рассеянной световой волны (по сравнению с обычным рассеянием Мандельштама — Бриллюэна). Надо заметить, что при вынужденном рассеянии усиливается лишь стоксов компонент рассеянного света. При некоторых условиях стоксов компонент, рассеянный назад (на 180°), будет иметь волновой фронт, форма которого совпадает с формой фронта исходной световой волны, т. е. будет иметь обращенный волновой фронт.

Кто кому больше обязан — нелинейная оптика лазерной технике или же лазерная техника нелинейной оптике? Есть хорошая поговорка: «долг платежом красен». Она как нельзя лучше характеризует «взаимоотношения» между лазерной техникой и нелинейной оптикой. С одной стороны, только благодаря изобретению лазера стало практически

возможным появление нелинейной оптики. С другой стороны, в настоящее время именно нелинейная оптика определяет в значительной мере дальнейшее развитие лазерной техники. Будучи сама «рождена лазером», нелинейная оптика, в свою очередь, открывает перед лазерной техникой новые перспективы.

Мы уже рассказывали о том, как используются для управления лазерным излучением различные нелинейно-оптические явления. Они используются для получения гигантских импульсов (лазеры с просветляющимся фильтром, в котором «работает» явление просветления среды),

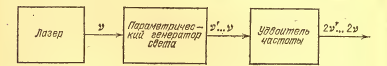


Рис. 39. Пример схемы для преобразования частоты лазерного излучения.

для растягивания лазерных импульсов во времени (лазеры с отрицательной обратной связью, осуществляемой за счет двухфотонного поглощения света), для умножения частоты лазерного излучения (умножители оптической частоты, называемые также генераторами оптических гармоник), для плавной перестройки частоты излучения (параметрические генераторы света) и т. д. Заметим, что при помощи генераторов оптических гармоник удалось заметно расширить освоенный диапазон когерентного излучения в сторону малых длин волн — до 0,01 мкм.

В практических схемах нередко используют в едином комплексе лазер, параметрический генератор света и генератор второй гармоники. Пример такой схемы дан на рис. 39. В схему входят лазер, генерирующий излучение частоты ν, параметрический генератор света, с помощью которого частота излучения может плавно перестраиваться в некотором диапазоне — от ν до ν' (ясно, что $\nu' < \nu$), удвоитель частоты (генератор второй оптической гармоники), позволяющий получать излучение с частотой в диапазоне от $2\nu'$ до 2ν.

В обычных схемах умножения частоты нелинейный кристалл, в котором рождается гармоника излучения, находится *вне* резонатора лазера. В настоящее время наряду с такими схемами используются также качественно иные схемы — когда нелинейный кристалл помещается

внутрь лазерного резонатора (рис. 40). В этом случае применяют термин «внутрирезонаторная генерация гармоники». Ее обычно реализуют в лазерах с непрерывной накачкой. Зеркала резонатора полностью отражают излучение частоты ν, генерируемое в активном элементе, и частично пропускают излучение частоты 2ν, рождающееся в нелинейном кристалле.

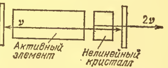


Рис. 40. Лазер с внутрирезонаторной генерацией второй гармоники.

Можно пойти дальше и попробовать не просто поместить активный элемент и нелинейный кристалл внутрь одного резонатора, но, более того, вообще совместить друг с другом активную и нелинейную среды. Речь идет о нелинейном кристалле, например ниобате лития, в который в качестве примеси введены активные центры. Подобные лазеры уже существуют. Их называют «лазерами с активно-нелинейными средами».

Большие возможности перед лазерной техникой открываются в связи с развитием методов адаптивной оптики. Используя нелинейные адаптивные зеркала, можно создавать лазеры, излучение которых будет одновременно и мощным, и высококогерентным.

Мы видим, таким образом, что нелинейная оптика широко вторгается в лазерную технику, открывая пути создания качественно новых генераторов когерентного оптического излучения. При этом успешно решаются задачи расширения освоенного диапазона частот, повышения интенсивности генерируемого излучения, улучшения его когерентных свойств.

Справка. К истории возникновения и развития нелинейной оптики. В 1923 г. советские физики С. И. Вавилов и В. Л. Левшин выполнили весьма интересный эксперимент. В опытах со светом высокой интенсивности (использовался искровой источник света) они наблюдали уменьшение коэффициента поглощения света в урановом стекле. При облучении стекла светом коэффициент поглощения уменьшался на 1,5% (при погрешности измерения 0,3%). Это был первый в мире нелинейно-оптический эксперимент. В нем впервые наблюдалось явление просветления среды в интенсивном световом поле.

Однако в те годы не приходилось рассчитывать на развертывание подобных исследований, поскольку отсутствовали источники мощного когерентного света. Несмотря на это, С. И. Вавилов много размышлял о возможных исследованиях нелинейных явлений в оптике. Его исключительная научная интуиция, умение видеть на много лет вперед в полной мере проявились в монографии «Микроструктура света», вышедшей в 1951 г. В этой монографии были удивительно полно сформулированы основные задачи и намечены принципиальные пути развития нового на-

правления в оптике. С. И. Вавилов дал этому направлению название *нелинейная оптика.*

Можно сказать, что первоначально нелинейная оптика родилась «на кончике пера», в сознании ученого. Ее создатель академик С. И. Вавилов не дожил до появления лазеров, позволивших широко развернуть нелинейно-оптические исследования. Он скончался в 1951 г.— за девять лет до изобретения лазера.

В 50-х годах советский физик Г. С. Горелик теоретически исследовал возможность наблюдения некоторых нелинейно-оптических явлений с помощью фотоэлектрических умножителей.

С появлением лазеров произошло второе (по сути дела, фактическое) рождение нелинейной оптики. В 1961 г. американский физик П. Франкен наблюдал в кристалле кварца генерацию второй гармоники излучения лазера на рубине. В 1961—1963 гг. советские физики Р. В. Хохлов и С. А. Ахманов вывели условия, при которых должны эффективно наблюдаться различные нелинейно-оптические явления, в том числе генерация оптических гармоник. Они же выдвинули и теоретически обосновали идею параметрической генерации света. В 1962 г. в МГУ имени М. В. Ломоносова была создана Лаборатория нелинейной оптики, быстро превратившаяся в один из ведущих мировых научных центров (в 1978 г. этой лаборатории присвоено имя академика Р. В. Хохлова). Выполненные в начале 60-х годов фундаментальные теоретические работы по нелинейной оптике нашли отражение в монографии С. А. Ахманова и Р. В. Хохлова «Проблемы нелинейной оптики», вышедшей в свет в 1965 г. Одновременно теоретические исследования в области нелинейной оптики проводились группой американских ученых, возглавляемой Н. Бломбергеном.

В 1962 г. советский физик Г. А. Аскарьян предсказал явление самофокусировки света. Его предсказание было подтверждено экспериментами советских физиков Н. Ф. Пилипецкого и А. Ф. Рустамова, впервые наблюдавших самофокусировку света (1965 г.).

К 1965 г. нелинейная оптика сформировалась как развитое, самостоятельное направление современной оптики. К этому времени появились достаточно эффективные генераторы оптических гармоник и первые параметрические генераторы света.

К нелинейной оптике тесно примыкает *адаптивная оптика.* Она изучает физико-технические проблемы создания оптических систем, параметры которых, режимы работы и даже сама структура могут приспосабливаться (адаптироваться) к изменяющимся внешним условиям. Адаптация осуществляется в целях улучшения характеристик системы, оптимизации ее поведения в тех или иных условиях. В широком смысле к адаптивным оптическим системам следует отнести все оптические системы с цепями обратной связи, которые позволяют соответствующим образом корректировать характеристики и поведение систем. В более узком смысле под адаптивными оптическими системами понимают системы, в которых реализуется корректировка волнового фронта светового пучка, подвергающегося каким-либо искажающим воздействиям. Из таких систем наиболее интересны системы с использованием явления обращения волнового фронта в нелинейных средах.

Обращение волнового фронта в нелинейных средах было открыто и исследовано советскими учеными: Б. И. Степановым, Е. В. Ивакиным, А. С. Рубановым в Институте физики АН БССР (1971 г.), Б. Я. Зельдовичем, В. И. Поповичевым, В. В. Рагульским, Ф. С. Файзулловым в Физическом институте имени П. Н. Лебедева АН СССР (1972 г.).

ЛАЗЕРНАЯ СВЯЗЬ

Можно ли разговаривать по световому лучу? С давних пор известен простой способ передачи информации при помощи световых вспышек. Во многих книгах описана ситуация, когда для передачи сообщения с одного берега широкого водоема на другой берег (или, скажем, с одного корабля на другой) используют яркий фонарь, который то закрывают чем-нибудь, то открывают. При этом необходимо знание азбуки Морзе и нужна ясная ночь.

В XVIII веке был изобретен оптический зеркальный телеграф (гелиограф). Тогда же появились специальные сигнальные семафоры, описанные, например, в широко известном романе А. Дюма «Граф Монте-Кристо».

Таковы были первые шаги оптической связи. Надо сказать, что они не получили развития. Из-за своей громоздкости, ненадежности, медлительности в передаче информации первоначальные линии оптической связи были впоследствии повсеместно вытеснены более совершенными линиями связи — электрическим телеграфом, а позднее электрическим телефоном. Затем появилась радиосвязь, ставшая в наши дни наиболее важным и распространенным видом связи. Принципы радиосвязи лежат в основе радиовещания, телевидения, радиоуправления, радиоастрономии и т. д.

Радиосвязь осуществляется на электромагнитных волнах в широком диапазоне частот — примерно от 10^4 Гц (волны длиной в десятки километров) до 10^{12} Гц (субмиллиметровые волны). При этом классический радиодиапазон простирается до 10^8 Гц (до метровых волн), а далее — от 10^8 до 10^{12} Гц — находится диапазон сверхвысоких частот, или, короче, СВЧ-диапазон.

С изобретением лазера человек получил в свое распоряжение источник интенсивного когерентного электромагнитного излучения в оптическом диапазоне частот — вплоть до 10^{15} Гц (вплоть до волн длиной в десятые доли микро-

метра). В связи с этим, естественно, встал вопрос о распространении принципов радиосвязи на оптический диапазон. Возникла и стала развиваться *лазерная связь* — связь, осуществляемая при помощи модулируемого лазерного излучения.

Возможно, не все читатели знают, что во многих точках земного шара действуют сегодня беспроводные линии телефонной связи — лазерные телефонные линии. Одна из таких линий функционирует в Москве; она связывает АТС, находящиеся на Зубовской площади и в здании МГУ на Ленинских горах. Расстояние между этими АТС около 5 км. По лазерному лучу, «связывающему» телефонные

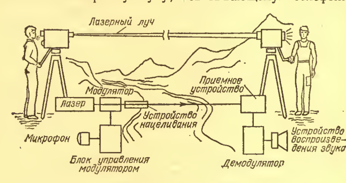


Рис. 41. Телефонная связь по лазерному лучу.

станции, можно одновременно вести несколько десятков телефонных разговоров. Такая же телефонная линия создана в Армении между Ереваном и Бюраканской астрофизической обсерваторией, находящейся на горе Арагац (длина линии около 50 км).

Рис. 41 дает представление о том, как осуществляется разговор по лазерному лучу. Обычно используют полупроводниковый лазер или лазер на гелий-неоне. Излучение лазера модулируется звуковыми колебаниями в модуляторе (модулятор управляется сигналами от низкочастотного блока, связанного с микрофоном) и через устройство нацеливания направляется к абоненту, находящемуся на приемном конце линии. Там лазерный луч попадает в приемное устройство, а затем в демодулятор, который выделяет звуковые колебания. Эти колебания усиливаются и попадают в устройство воспроизведения звука.

По лазерному лучу передают не только телефонные разговоры; по нему можно передавать также и телевизи-

онную программу. В 1970 г. в г. Тбилиси был впервые проведен необычный семичасовой сеанс передачи первой программы республиканского телевидения. Луч лазера соединил студию телецентра с передающей станцией, находящейся на горе Мтацминда.

Чем интересна и перспективна лазерная связь? Как известно, для передачи речи, музыки, изображений надо соответствующим образом *модулировать* электромагнитную волну, например, надо изменять по определенному закону ее амплитуду. Часто́ты, характеризующие быстроту изменений амплитуды волны *(часто́ты модуляции)*, должны быть по крайней мере в десять-сто раз меньше частоты самой волны *(несущей частоты)*. Часто́ты модуляции занимают некоторую полосу *(полосу частот модуляции)*. Ее ширина тем больше, чем больше объем информации, передаваемой в единицу времени.

Для передачи речи достаточна полоса частот 10—100 Гц, тогда как для передачи музыки требуется полоса шириной 10^4 Гц. Именно такова ширина полосы частот радиовещания. Чтобы не мешать друг другу, две радиостанции должны работать на несущих частотах, различающихся не менее, чем на 10^4 Гц. Для радиовещания пригодны волны с несущей частотой не ниже примерно 10^5 Гц. Частотный диапазон от 10^5 до 10^8 Гц можно разбить на 10 000 «участков» шириной 10^4 Гц каждый (строго говоря, на 9990 «участков»). Это означает, что в классическом радиодиапазоне от длинных (километровых) до ультракоротких (метровых) волн могут одновременно работать, не мешая друг другу, не более 10 000 радиостанций — при условии использования каждой из них одной строго определенной несущей частоты.

Для передачи движущихся изображений требуется полоса частот модуляции, в тысячу раз более широкая, чем в радиовещании. Телевизионная полоса частот имеет ширину порядка 10^7 Гц. Это значение соответствует верхней граничной частоте видеосигнала. Ее нетрудно оценить. Действительно, предположим, что кадры на экране телевизора сменяются с частотой 50 Гц. Если электронный луч, скользящий по экрану кинескопа, пробегает за один кадр 400 строк, то это означает, что «смена» строк должна происходить с частотой $50\cdot400=2\cdot10^4$ Гц. Если, наконец, в каждой строке выделить 400 зрительных «точек», то частота модуляции интенсивности электронного луча составит $2\cdot10^4\cdot400=8\cdot10^6$ Гц.

Чтобы передавать информацию, требующую полосы частот модуляции шириной 10^7 Гц, нужна несущая

частота не ниже 10^8 Гц. Для этого надо перейти из классического радиодиапазона в СВЧ-диапазон. В частотном диапазоне, соответствующем, например, дециметровым волнам (от 10^8 до 10^9 Гц), «умещается» около ста телевизионных программ. В этом же диапазоне частот могли бы работать около 100 000 радиостанций.

Приведенные примеры иллюстрируют общее правило: *по мере увеличения несущей частоты возрастает информационная емкость канала связи.* Ясно, что использование оптического когерентного излучения с несущей частотой до 10^{15} Гц могло бы очень существенно увеличить информационную емкость канала связи. Нетрудно подсчитать, что в таком канале можно, в принципе, «уместить» 10^{13} телефонных разговоров, или 10^{11} музыкальных передач, или 10^8 телевизионных программ. Эти числа выглядят фантастически огромными. Они во много раз перекрывают практические потребности общества не только сегодня, но и в обозримом будущем.

Правда, данные оценки не учитывают некоторых ограничивающих факторов, играющих важную роль при практическом осуществлении лазерной связи. Во-первых, эти оценки справедливы лишь для идеально когерентного лазерного излучения. В действительности же в картине дружно летящих фотонов, образующих лазерный луч, всегда в той или иной мере наблюдаются «сбои», случайные отклонения от общего порядка, ухудшающие степень когерентности излучения. Чем выше частота излучения, тем чаще наблюдаются подобные «сбои». Во-вторых, на практике возникают серьезные трудности технического характера. Они связаны с отсутствием в настоящее время модуляторов, имеющих достаточно широкую полосу частот модуляции, а также быстродействующих (малоинерционных) фотоприемников. Все эти факторы снижают на несколько порядков приведенные ранее оценки, характеризующие информационную емкость лазерного канала связи.

Тем не менее и в этом случае освоение оптического диапазона представляется весьма перспективным. Оно помогло бы связистам решить, наконец, проблему «тесноты в эфире», столь обострившуюся в наше время. Вещательные станции, использующие лазерное излучение, смогут работать, нисколько не мешая друг другу (даже при условии, что число станций превысит в сотни, тысячи раз число имеющихся сегодня радиостанций). Лазерная телефонная сеть больших городов и крупных промышленных

районов позволила бы существенно увеличить число абонентов и при этом освободиться от дорогостоящей и громоздкой системы подземных телефонных кабелей.

Говоря о перспективности лазерной связи, отметим еще одно достоинство лазерного луча — его высокую *направленность*. Обычные радиостанции излучают в пределах широкого телесного угла. Применяя специальные антенны, добиваются направленности излучения. Однако степень направленности радиоизлучения остается более низкой по сравнению с направленностью лазерного луча. Угол расходимости луча θ определяется отношением λ/D, где λ — длина волны излучения, а D — диаметр передающей антенны. При $\lambda=1$ мкм и $D=0{,}1$ м этот угол составляет всего 10^{-5} рад, что соответствует угловой секунде.

Благодаря высокой направленности лазерного луча можно осуществлять несколько каналов связи на одной несущей, выбирая всякий раз разные направления в пространстве. Направленность излучения позволяет существенно уменьшить потребление энергии на питание передающего устройства. Кроме того, уменьшается опасность нежелательного перехвата передаваемой информации.

Отмечая преимущества лазерной связи, мы должны в то же время указать одно ее уязвимое место. Речь идет о влиянии атмосферы на лазерный луч. Туман, дождь, снегопад, пыль, облачность — все это, как известно, резко ограничивает видимость, а значит, срывает оптическую связь. Об этом мы еще поговорим позднее.

Будут ли развиваться системы космической лазерной связи? На наших глазах происходит бурное развитие космической техники, а следовательно, и *космической связи*. Осуществляется оперативная двусторонняя связь между Землей и пилотируемыми космическими кораблями, орбитальными станциями, позволяющая передавать не только речь, но и телевизионные изображения. С Земли осуществлялось управление советским аппаратом «Луноход», перемещавшимся по лунной поверхности; на Землю поступала информация от «Лунохода». Большой объем важной информации получили ученые от советских автоматических межпланетных станций серий «Марс» и «Венера», использовавшихся для изучения ближайших к нам планет. Станции «Венера» передали на Землю цветные панорамы поверхности Венеры, данные о составе и особенностях ее атмосферы, о химическом составе горных пород планеты. Американские межпланетные станции «Пионер» и «Вояджер» передали на Землю информацию о планетах

Юпитер, Сатурн, их спутниках. В настоящее время вокруг Земли обращается множество спутников связи, предназначенных для осуществления дальней телефонно-телеграфной связи и передач программ телевидения. Среди них советские спутники «Молния», «Радуга», «Экран», «Горизонт», американские спутники «Интелсат».

Подчеркнем, что развитие дальней и сверхдальней наземной связи (телефонной, телеграфной, телевизионной) органически связано с развитием космической связи — через систему спутников. С помощью специальных спутников, а также орбитальных станций и пилотируемых космических кораблей проводятся важные для народного хозяйства геофизические исследования. Развитие космической связи особенно необходимо для развертывания исследований ближнего и дальнего космоса — для изучения околоземного пространства, Луны, планет Солнечной системы, для осуществления широкой программы астрофизических исследований.

Все эти задачи космической связи решаются *на современном этапе* в СВЧ-диапазоне — с использованием дециметровых, сантиметровых, миллиметровых волн. Линии *лазерной* космической связи существуют пока фактически только в виде проектов. Проводятся лишь отдельные эксперименты по осуществлению на практике лазерной космической связи. Ряд проектов, разработанных десять и более лет назад, все еще остаются нереализованными.

Чем это объясняется? Конечно, при практическом освоении новых методов связи (нового частотного диапазона) неизбежно возникает множество технических проблем. О некоторых из них (необходимости создания подходящих модуляторов света и фотоприемников) мы уже упоминали. Говоря о проблемах развития лазерной космической связи, выделим следующие два момента. Во-первых, прямая лазерная связь между космическим аппаратом и Землей практически невозможна из-за воздействия земной атмосферы на лазерный луч. Надо создавать «радиомост» между Землей и спутником, а затем уже осуществлять лазерную связь между спутником и космическим аппаратом. Во-вторых, выгодная в одних отношениях высокая направленность лазерного луча оказывается невыгодной в других отношениях. Трудно попадать узким лучом в фотоприемник, находящийся на удаленном космическом аппарате, трудно сопровождать его лучом, не теряя с ним связи. Это тем более трудно, что лазерный передатчик находится не на Земле, а на спутнике или космическом аппарате.

И тем не менее все эти трудности придется рано или поздно преодолевать (возможно, комбинируя лазерные и сверхвысокочастотные линии связи). Пока для космической связи вполне достаточен СВЧ-диапазон. Однако со временем он уже не сможет «справиться» с возросшими задачами. Это произойдет тогда, когда потребуется передавать на Землю из космоса или от одного космического аппарата к другому большой объем информации за малое время. Подсчитано, что для передачи информации из ближнего космоса со скоростью порядка и выше 10^8 бит/с *) даже миллиметровый диапазон уже не может конкурировать с оптическим (с учетом массы, габаритов, энергопотребления бортовой аппаратуры связи). Здесь-то и проявятся преимущества лазерной связи — ее исключительная информационная емкость и высокая направленность. Последнее обстоятельство будет иметь решающее значение для уменьшения массы и габаритов аппаратуры, снижения энергопотребления.

Собственно говоря, уже сегодня мы вполне приблизились к задачам, требующим передачи информации по космической связи с высокой скоростью. Например, в январе 1983 г. в США запущен спутник «IRAS» для астрономических исследований в инфракрасной области спектра, передающий на Землю информацию со скоростью 10^6 бит/с. Высокая скорость передачи информации требуется, в частности, для оперативной связи между космическим кораблем и реактивным самолетом, между двумя космическими кораблями, между космическим кораблем и орбитальной станцией. Именно для таких целей американская фирма «ITT» проектирует для НАСА (Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства) лазерную систему связи со скоростью передачи информации 10^8 бит/с. В системе используется лазер на гранате с неодимом с выходной мощностью 1 Вт. Дальность действия линии связи до 50 тыс. км.

Чем более дальней будет космическая связь, тем сильнее проявятся преимущества оптического диапазона. Например, используя регулярную последовательность наносекундных лазерных импульсов с частотой следования 10 МГц, можно передавать информацию со скоростью 10^6 бит/с с орбиты планеты Нептун. При этом должна при-

*) Бит — единица информации; соответствует информации, содержащейся в ответе «да — нет» в случае, когда обе возможности («да» или «нет») равновероятны.

меняться импульсно-кодовая модуляция излучения, осуществляемая по принципу «включено — выключено» («включено» — соответствующий лазерный импульс в импульсной последовательности сохраняется, «выключено» — импульс отсутствует). Можно утверждать, что космические путешествия в будущем будут невозможны без лазерной связи.

Отдавая дань научной фантастике, заметим, что лазеры делают возможным осуществление межзвездной связи. Лазерный импульс с энергией 10^4 Дж, длительностью 1 нс, расходимостью 10^{-6} рад может быть зарегистрирован на Земле с расстояния 100 световых лет (!). Для приема такого сигнала должен использоваться оптический телескоп с зеркалом диаметром 100 м.

Каковы трудности реализации лазерной связи в наземных условиях? Основным препятствием для создания надежных линий лазерной связи в наземных условиях является воздействие атмосферы на лазерный луч. Это воздействие может сорвать не только дальнюю, но и относительно близкую связь, например лазерную телефонную связь между двумя объектами в пределах города.

Влияние атмосферы на лазерный луч двоякое. Во-первых, происходит постепенное *уменьшение интенсивности* луча из-за поглощения и рассеяния света газами, парами воды, аэрозолями *). Во-вторых, происходят накапливающиеся по мере распространения излучения по трассе *искажения волнового фронта*, обусловленные главным образом турбулентностью атмосферы.

Поглощение света в атмосфере очень сильно зависит от длины волны. Это хорошо видно из рис. 42, где приведена зависимость коэффициента пропускания земной атмосферы от длины волны излучения, полученная вблизи поверхности Земли (шкала длин волн здесь логарифмическая). Римскими цифрами на рисунке помечены так называемые *окна прозрачности* атмосферы. Видно, что излучение лазеров на гранате с неодимом (1,06 мкм) и CO_2-лазеров (10,6 мкм) как раз попадает в окна прозрачности.

Для борьбы с искажениями волнового фронта стремятся повысить степень направленности излучения, подстерегают благоприятные погодные условия. Все эти меры не позволяют, однако, увеличить длину наземных линий

*) Аэрозоли — среды, содержащие капельки воды, кристаллики льда (в виде тумана и облаков), пыль, сажу, микроорганизмы и т. п. Размеры аэрозольных частиц колеблются от 10^{-6} до 0,1 см. Особенно много аэрозольных частиц в нижних слоях атмосферы.

связи более нескольких десятков километров. Главное же, все равно остается зависимость качества и самого факта наличия связи от погодных условий.

Ожидается, что ситуация может качественно измениться при использовании в линиях лазерной связи методов *адаптивной оптики*, позволяющих необходимым образом *корректировать* волновой фронт излучения. Эта надежда хорошо высказана американским исследователем Д. Фридом: «Так же, как о погоде, многие имели обыкновение рассуждать о турбулентности земной атмосферы, но никто не пытался с ней бороться. Однако теперь ситуация быстро

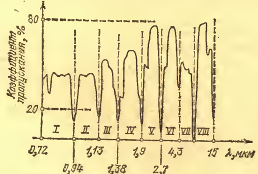


Рис. 42. Зависимость коэффициента пропускания света земной атмосферой от длины волны света.

меняется. Оптическая техника достигла такого уровня развития, что у нее появилась возможность как-то противостоять вредному влиянию турбулентности на распространение оптического сигнала. Это «как-то» получило название «адаптивная оптика».

Как будут выглядеть линии лазерной связи, построенные с применением методов адаптивной оптики? Один из возможных вариантов такой линии связи схематически показан на рис. 43. Излучение от лазера расщепляется на два пучка. Один поступает в анализатор волнового фронта, а другой посылается на мишень (объект, находящийся на приемном конце трассы). Световой пучок создает на мишени относительно яркий блик. Блик должен быть малым, чтобы его можно было рассматривать как точечный излучатель, посылающий назад по трассе сферическую световую волну. Распространяясь по трассе в обратном направлении, эта волна испытает те же искажающие воздействия, что и волна от лазера, проходящая трассу в

прямом направлении. На излучающем конце трассы искаженная волна, пришедшая от блика, сравнивается (в анализаторе волнового фронта) с неискаженной, т. е. сферической волной. На основе этого сравнения устройство

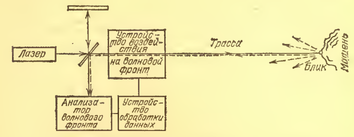


Рис. 43. Линия лазерной связи с применением адаптивной оптики.

обработки данных рассчитывает необходимое предыскажение, которое надо ввести в излучаемый волновой фронт, чтобы скомпенсировать искажения, вносимые трассой. Для внесения этих предыскажений используется устройство воздействия на волновой фронт.

Как распространяется свет в диэлектрических волокнах? Чтобы полностью избавиться от влияния атмосферы, можно воспользоваться специальными световодами. Большое распространение получили световоды в виде тонких диэлектрических волокон, в связи с чем возникло новое направление в современной оптике — *волоконная оптика.*

Введенный внутрь волокна световой пучок удерживается внутри него благодаря явлению *полного внутреннего отражения света* от боковой поверхности волокна. Свет бежит по волокну, покорно следуя всем его изгибам (рис. 44, *а*). Для более надежного удержания света внутри волокна применяют специальные волокна, называемые *градиентными.* В них показатель преломления максимален вблизи оси волокна и плавно уменьшается по направлению к боковой поверхности. Траектория светового луча в градиентном волокне показана на рис. 44, *б*.

Различают *толстые* волокна (диаметр порядка 100 мкм) и *тонкие* волокна (диаметр порядка 1 мкм и меньше). Строго говоря, изображать траекторию светового луча внутри волокна можно лишь в случае толстых волокон, когда длина волны света много меньше диаметра волокна. При распространении света в тонких волокнах геометрическая оптика непригодна, здесь надо пользоваться волновыми представлениями. Поле световой волны, бе-

гущей по тонкому волокну, заполняет весь объем волокна и частично проникает в пространство, окружающее волокно.

Важной характеристикой волокна является величина потерь излучения в волокне, отнесенная к длине волокна. Потери измеряют в единицах, называемых *децибелами на километр* (дБ/км). Представим себе километровый отрезок волокна. Пусть на его вход поступает свет интенсивностью I_1, а на выходе регистрируется интенсивность I_2. Потери в волокне измеряются количеством N децибелов, определяемым по формуле: $I_1/I_2=10^{N/10}$. Если, например, говорят, что потери составляют 10 дБ/км ($N=10$),

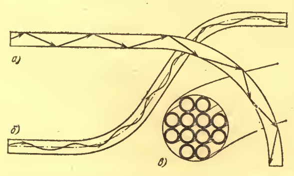


Рис. 44. *а*) Световые лучи в простом волокне. *б*) Световые лучи в градиентном волокне. *в*) Поперечный разрез волоконного жгута.

то это означает, что при прохождении километрового участка волокна интенсивность света падает в 10 раз. Ясно, что из такого волокна нельзя создать длинную линию связи.

Прогресс в волоконной оптике связан с созданием в 1972—1973 гг. волокон, потери в которых составляли 5 дБ/км. Для таких волокон $I_1/I_2=3{,}16$. В настоящее время имеются волокна с потерями всего 0,2 дБ/км в спектральном диапазоне 1,2—1,6 мкм. В таких волокнах $I_1/I_2=$ $=1{,}05$. Указанные волокна изготавливают из кварцевого стекла с добавлением германия или бора.

Какие задачи решает волоконная оптика? Волокна с малыми потерями (меньше 1 дБ/км) используют для создания волоконных линий связи протяженностью до нескольких километров. Такие линии могут обеспечивать, например, надежную телефонную связь в пределах города. Создание таких линий связи перспективно, поскольку волоконный

жгут существенно тоньше обычного телефонного кабеля и в то же время он позволяет вести значительно больше телефонных разговоров, чем обычный кабель.

Разнообразные и очень важные применения находят относительно короткие волоконные линии связи. Приведем некоторые примеры.

Известно, что одно из «узких мест» современных ЭВМ — *системы коммуникации*, предназначенные для ввода и вывода информации, для осуществления связи между процессором и памятью, а также связи между несколькими ЭВМ. Эти системы коммуникации представляют собой сложные переплетения большого количества проводов, в которых наводятся шумовые электрические токи, создаются неустранимые помехи. Здесь проявляется недостаток, присущий всем электрическим системам связи — принципиальная невозможность идеальной развязки между входом и выходом, чувствительность к всевозможным внешним наводкам. Поэтому использование в современных ЭВМ систем коммуникации на основе волоконной оптики представляется очень перспективным. Это особенно важно при организации связи между быстродействующими ЭВМ.

Системы управления современного самолета перенасыщены проводами. Замена проводов оптическими волокнами позволит не только повысить качество системы управления, но и снизить массу самолета.

По волоконным линиям связи можно передавать движущиеся изображения непосредственно, не производя построчного разложения картинки на последовательность сигналов. Для этого волокна компонуют в жгут. Поперечный разрез такого жгута с относительно малым числом волокон показан на рис. 44, *в*. В применяемых на практике жгутах число волокон может доходить до миллиона. Принцип передачи изображения по волоконному жгуту достаточно прост. Можно сказать, что световые лучи, отраженные или испущенные тем или иным элементом передаваемого изображения, улавливаются соответствующим волокном в жгуте, проходят по всей длине жгута и на выходе воспроизводят данный элемент изображения. Сохраняя на выходе жгута такое же взаимное расположение волокон, что и на входе, мы воспроизводим на выходе то изображение, которое подавалось на вход. В частности, мы можем принимать изображения объектов, находящихся в труднодоступных местах. Врачи могут рассматривать внутренние стенки полых органов человека (стенки пищевода, желудка, кишок и т. д.).

ЛАЗЕРЫ В СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ И ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Что такое пространственный оптический сигнал? Обратимся к рис. 45. Луч от лазера проходит через систему линз, увеличивающую его поперечное сечение, и затем попадает на тонкий транспарант. Прозрачность транспаранта определенным образом изменяется по его площади, т. е. в плоскости координат x, y; например,

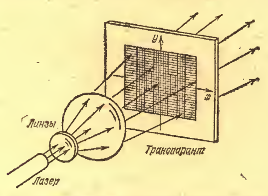


Рис. 45. Что такое пространственный оптический сигнал.

на двукратно заштрихованных участках она меньше, чем на заштрихованных однократно. В лазерном пучке, прошедшем сквозь такой транспарант, напряженность светового поля будет неодинаковой по поперечному сечению пучка — она будет меньше в тех точках апертуры пучка, которые соответствуют световым лучам, прошедшим через двукратно заштрихованные участки транспаранта.

О таком световом пучке говорят, что он *пространственно модулирован* (модулирован в плоскости пространственных координат x и y) или, иначе, что он является носителем *пространственного оптического сигнала*. Транспарант выступает здесь в роли *пространственного модулятора* лазерного пучка. В ситуации, рассматриваемой

на рис. 45, осуществляется *амплитудная* пространственная модуляция. Возможна также *фазовая* модуляция (когда, например, прозрачность транспаранта везде по его площади одинакова, но зато изменяется толщина транспаранта).

Пусть пространственный сигнал описывается некоторой функцией $s(x, y)$. В случае амплитудной модуляции эта функция выражает зависимость степени прозрачности транспаранта от координат x, y; s — коэффициент прозрачности транспаранта. В случае фазовой модуляции указанная функция выражает зависимость толщины транспаранта от координат x и y; s — толщина транспаранта.

Чтобы стать носителем пространственного сигнала, лазерный пучок должен либо пройти сквозь транспарант-модулятор, либо отразиться от него. Предварительно пространственный сигнал должен быть «записан» на транспаранте, для чего надо определенным образом промодулировать ту или иную оптическую характеристику транспаранта. Существуют различные виды транспарантов, допускающих стирание и повторную запись пространственных сигналов под действием соответствующих управляющих сигналов. Если управление осуществляется электрическими сигналами, то говорят об *электрически управляемых транспарантах* (ЭУТ). Если управление осуществляется при помощи вспомогательного светового луча, то говорят об *оптически управляемых транспарантах* (ОУТ).

В ЭУТ можно осуществлять запись пространственного сигнала, например при помощи сканируемого по поверхности транспаранта электронного пучка, интенсивность которого меняется во времени по определенному закону. В качестве материала транспаранта можно использовать термопластик или слой двулучепреломляющего кристалла (например кристалла DKDP). В первом случае сканируемый электронный луч фиксирует определенный рельеф поверхности термопластика; пространственный сигнал записывается в виде определенной зависимости от координат x и y толщины слоя термопластика. Во втором случае электронный луч, управляя напряженностью электрического поля в разных точках транспаранта, записывает пространственный сигнал в виде зависимости от координат x и y разности фаз обыкновенного и необыкновенного световых лучей, возникающей при их прохождении сквозь слой кристалла DKDP.

Применяя в качестве материала транспаранта слой жидкого кристалла, создают ЭУТ, управляемые просто за

счет приложения в соответствующих точках транспаранта определенной разности потенциалов. Слой жидкого кристалла толщиной порядка 10 мкм помещают между тонкими прозрачными электродами, выделяющими на поверхности слоя жидкого кристалла «ячейки» размерами, например, 100×100 мкм (или даже меньше). Если на ту или иную «ячейку» подано напряжение, то в этом месте в слое жидкого кристалла возникают гидродинамические неоднородности, сильно рассеивающие свет; в результате прозрачность «ячейки» уменьшается. Подавая напряжение 10 В, можно в 10 раз снизить интенсивность света, проходящего сквозь слой жидкого кристалла толщиной 10 мкм. Используя жидкокристаллический ЭУТ, можно таким образом осуществлять амплитудную пространственную модуляцию лазерного пучка.

В ОУТ, как и в ЭУТ, применяют различные материалы и используют различные физические явления. Часто применяют те же материалы, что и в ЭУТ (например, жидкие кристаллы и термопластики), нанося на их поверхность специальный светочувствительный слой. Управление в ОУТ осуществляет вспомогательный световой луч с изменяющейся во времени по определенному закону интенсивностью, который сканируют по поверхности транспаранта.

Одна из наиболее важных характеристик пространственного модулятора — его пространственное разрешение, т. е. число разрешаемых параллельных линий в пределах миллиметра. Если, например, «ячейка» жидкокристаллического транспаранта имеет размеры 100×100 мкм, то это означает, что пространственное разрешение составляет в данном случае 10 $мм^{-1}$ (10 линий на миллиметр). Характерное пространственное разрешение в ЭУТ 10—100 $мм^{-1}$. В ОУТ разрешение может быть больше; так, в ОУТ с термопластиками оно достигает 1000 $мм^{-1}$.

Пусть f — пространственное разрешение транспаранта (в $мм^{-1}$), а S — площадь его рабочей апертуры (в $мм^2$). Тогда $N = Sf^2$ есть информационная емкость данного транспаранта, выраженная в битах. Например, при $f = 100$ $мм^{-1}$ и $S = 1000$ $мм^2$ (транспарант размерами примерно 3×3 см) получаем $N = 10^7$ бит.

Другая важная характеристика пространственного модулятора — максимально возможная частота смены «картинок», т. е. записанных на транспаранте пространственных сигналов. Ведь для того чтобы стереть записанную «картинку» и записать новую, требуется какое-то время.

Характерное значение указанной частоты составляет для используемых на практике модуляторов 100—1000 Гц.

Пространственный сигнал, пространственная модуляция могут рассматриваться как специфически *оптические* понятия. Возможность осуществления пространственной модуляции — привилегия оптического диапазона. В радиодиапазоне модуляция излучения осуществляется во времени *(временна́я модуляция)*: сначала подвергается модуляции во времени ток высокой частоты в передатчике, затем антенна «преобразует» модулированный ток в модулированную радиоволну. Разумеется, модуляция во времени может осуществляться и в оптическом диапазоне. Кстати говоря, именно об этой модуляции светового луча шла речь в предыдущем рассказе, посвященном лазерной связи. Однако, в отличие от радиодиапазона, в оптическом диапазоне широко применяется также и пространственная модуляция. Она играет принципиально важную роль в оптических системах обработки информации.

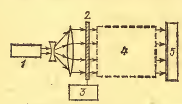


Рис. 46. Принципиальная схема оптической системы обработки информации: *1* — лазер, *2* — пространственный модулятор, *3* — устройство управления пространственным модулятором, *4* — оптическое решающее устройство (процессор), *5* — преобразователь выходных оптических сигналов.

Что представляет собой оптическая система обработки информации? Принципиальная схема такой системы показана на рис. 46. Пространственный модулятор (ЭУТ или ОУТ) создает пространственно модулированный лазерный пучок, поступающий в оптическое решающее устройство, в котором осуществляется заданное преобразование входного пространственного сигнала. Это устройство представляет собой набор различных элементов (линз, диафрагм, специальных фильтров, дифракционных решеток, голограмм, зеркал и т. д.), расположенных в пространстве определенным образом. Преобразователь выходных сигналов фиксирует результаты обработки информации, например в виде фотографического изображения или голограммы. Он может также преобразовывать выходной оптический сигнал в электрические сигналы (фотоумножитель, видикон и т. д.). Рассматриваемый преобразователь может выполнять роль оптического запоминающего устройства или может быть связан с запоминающим устройством.

В качестве примера рассмотрим оптическую систему, позволяющую осуществлять так называемую *пространственную фильтрацию*. Схема оптического решающего устройства показана на рис. 47. В схеме используются две собирающие линзы с фокусным расстоянием F. Здесь P_1 — входная плоскость, P_2 — плоскость фильтрации, P_3 — выходная плоскость. Взаимное положение этих плоскостей и линз показано на рисунке. Если в плоскости фильтрации P_2 ничего нет, то в выходной плоскости P_3 будет



Рис. 47. Схема оптического решающего устройства, осуществляющего пространственную фильтрацию.

Объект	Спектр	Изображение	
			а)
			б)
			в)

Рис. 48. Что такое пространственный спектр.

воспроизводиться перевернутая (по обеим поперечным координатным осям) «картинка», поступившая на входную плоскость P_1. В этом случае система не изменяет входного пространственного сигнала (если не учитывать упомянутое переворачивание).

Иное дело, когда в плоскости P_2 помещен некий фильтр. Пусть, например, «картинка» в плоскости P_1 есть сетка из пересекающихся тонких линий. На рис. 48 даны эта «картинка», формируемый в плоскости P_2 пространственный сигнал (его называют *пространственным спектром* исходной «картинки» *)) и «картинка» в плоскости P_3. Рассмотрены три случая: *а)* в плоскости P_2 нет фильтра, *б)* в плоскости P_2 находится фильтр в виде узкой горизонтальной щели, *в)* в плоскости P_2 находится фильтр в виде узкой вертикальной щели. Приведенный пример весьма прост. Мы воспользовались им лишь для того, чтобы продемонстрировать, как пространственная фильтрация может изменять входной пространственный сигнал.

Теперь обратимся к задаче, имеющей большое практическое значение. Речь пойдет о задаче *распознавания образов*. Это может быть, например, задача поиска и выделения той или иной буквы или какого-то слова из некоторого текста.

Как решается задача распознавания образов? Предположим, что надо опознать букву «е» в тексте. Для этого сначала изготавливают так называемый *согласованный фильтр* (фильтр, согласованный со спектром пространственного сигнала, соответствующего изображению опознаваемой буквы «е»). Его изготавливают, используя оптическую схему, предложенную в 1963 г. американским ученым ван дер Люгтом. Схема ван дер Люгта показана на рис. 49. В плоскости P_1 помещают транспарант с изображением буквы «е». В плоскости голограммы интерферируют опорный пучок и световая волна, структура поля

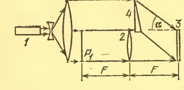


Рис. 49. Схема ван дер Люгта: *1* — лазер, *2* — линза с фокусным расстоянием *F*, *3* — слой фотоэмульсии для записи голограммы, *4* — призма, направляющая на поверхность голограммы вспомогательный (опорный) световой пучок.

которой соответствует пространственному спектру изображения буквы «е». Получающаяся при этом голограмма и есть требуемый согласованный фильтр.

Поместим этот фильтр в плоскости P_2 в схеме пространственной фильтрации, показанной на рис. 47, а в пло-

*) Не следует путать пространственный спектр с обычным спектром (спектром частот).

скости P_1 поместим транспарант с изображением исследуемого текста. В плоскости P_3 возникнет сильно смазанное, практически неразличимое изображение, содержащее *яркие точки*. Количество и взаимное расположение этих точек соответствуют количеству и взаимному расположению букв «е» в исследуемом тексте. Упрощенное объяснение возникновения ярких точек таково. Если в изображении,



Рис. 50. Опознавание буквы «е» в тексте.

помещенном в плоскости P_1, присутствует буква «е», то распространяющееся от нее световое поле, достигнув фильтра-голограммы, сыграет роль считывающей волны и восстановит тот самый опорный световой пучок, который использовался в схеме ван дер Люгта на этапе записи фильтра-голограммы. Этот опорный пучок имеет *плоский* волновой фронт; поэтому вторая линза в схеме на рис. 47 сфокусирует его в яркую точку в задней фокальной плоскости линзы (в плоскости P_3).

На рис. 50 приведен для примера результат опознавания буквы «е» в фразе «Береги честь смолоду». Здесь: *а)* исходный пространственный сигнал, *б)* пространственный сигнал, фиксируемый в плоскости P_3 (видны три яркие точки, соответствующие букве «е» в исходном сигнале), *в)* распределение яркости в выходной плоскости P_3 (видно, что упомянутым трем ярким точкам отвечают наиболее высокие максимумы в этом распределении).

Применяются и другие оптические схемы для решения задачи распознавания образов. Мы ограничимся приведенным выше примером. Не будем рассматривать и многочисленные примеры выполнения тех или иных преобразований пространственных сигналов. Все это составляет содержание специального научно-технического направления, возникшего в последние годы на стыке радиотехники и оптики и называемого *радиооптикой*.

Как работает голографическое запоминающее устройство? Рассмотрим конкретный пример запоминающего устройства, в котором используются принципы голографии. Важным элементом такого устройства является *запоминающая голографическая матрица*, составленная из большого числа голограмм, каждая диаметром 2—5 мм (рис. 51, *а*).

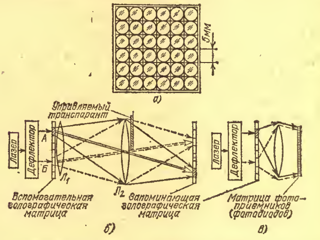


Рис. 51. *а*) Запоминающая голографическая матрица. *б*) Схема голографического запоминающего устройства. *в*) Схема считывания информации.

На одной такой голограмме можно записать значительный массив информации — до 10^4 бит. Каждая голограмма фиксирует и хранит интерференционную картину, получающуюся при сложении опорного светового пучка и волны, промодулированной некоторым пространственным сигналом.

Оптическая схема голографического запоминающего устройства показана на рис. 51, *б*. Луч от лазера попадает в электрооптический дефлектор дискретного типа (мы рассматривали такой дефлектор во втором рассказе). Деф-

лектор по команде направляет лазерный луч в ту или иную голограмму во вспомогательной голографической матрице. С каждой из этих голограмм восстанавливается при освещении лучом лазера расходящаяся световая волна. Та часть светового луча, которая проходит сквозь голограмму, не испытывая дифракции, отклоняется линзой $Л_1$, пересекает линзу $Л_2$ в ее центральной части и попадает на одну из голограмм в запоминающей матрице (заметим, что линза $Л_2$ помещена в фокальной плоскости линзы $Л_1$). Попадая на голограмму в запоминающей матрице, рассматриваемый световой луч интерферирует с той световой волной, которая вначале была расходящейся, а потом, благодаря линзе $Л_2$, стала сходящейся. Эта световая волна на своем пути от вспомогательной до запоминающей голографической матрицы проходит через управляемый транспарант и становится носителем соответствующего пространственного сигнала. Сплошные стрелки-лучи на рисунке соответствуют ситуации, когда дефлектор фиксирует лазерный луч в положении *А*, а штриховые стрелки-лучи — когда дефлектор фиксирует луч в положении *Б*. Меняя с помощью дефлектора исходное положение лазерного луча и одновременно меняя пространственный сигнал, записываемый всякий раз в материале управляемого транспаранта, можно постепенно «заполнить» определенной информацией все элементы (все голограммы) запоминающей матрицы.

Рассмотренная схема может использоваться для вывода информации из ЭВМ с последующей записью этой информации в голографическом запоминающем устройстве. Информация, выводимая из ЭВМ, поступает в виде управляющих электрических сигналов в ЭУТ (в управляемый транспарант на рис. 51, *б*).

На рис. 51, *в* показана схема считывания хранящейся информации. При наличии соответствующей команды дефлектор направляет считывающий лазерный луч на определенную голограмму в запоминающей матрице; восстановленное изображение проецируется на матрицу фотоприемников. В результате пространственный оптический сигнал, записанный в данном элементе запоминающей матрицы, преобразуется в совокупность электрических сигналов.

Чем интересны и перспективны оптико-электронные вычислительные системы? К таким системам относятся вычислительные комплексы, в которых наряду с электронными устройствами применяются оптические элементы

и оптические устройства, работающие с использованием высококогерентного лазерного излучения. В предыдущем рассказе мы уже говорили о волоконно-оптических линиях связи в системах коммуникации современных ЭВМ. Эти линии позволяют упростить системы коммуникации (освободив ЭВМ от обилия проводов) и осуществить идеальную развязку между входом и выходом, между разными каналами передачи. К тому же волоконно-оптические каналы связи характеризуются высокой информационной емкостью.

Введение информации в ЭВМ по волоконно-оптическим линиям связи — новый этап в развитии современных ЭВМ. В ближайшем будущем будет сделан следующий шаг: информация в вычислительную машину будет вводиться непосредственно в виде «картинок», в виде двумерных изображений и в таком виде будет обрабатываться в оптических процессорах. При этом будет реализована огромная скорость ввода информации. Уже сегодня пространственные модуляторы формируют пространственные сигналы емкостью до 10^7—10^9 бит информации. При частоте смены «картинок», равной 10^3 Гц, может быть реализована скорость ввода информации до 10^{12} бит/с. Для оптических систем обработки информации характерна одновременная обработка сразу многих больших массивов информации (*многоканальная* обработка информации). Это предопределяет высокое быстродействие оптических процессоров. Наконец, следует иметь в виду, что многие математические операции выполняются оптическими методами гораздо проще, быстрее и надежнее, чем традиционными методами, использующими электронные устройства.

Перспективны не только оптические системы коммуникации и оптические процессоры. Не менее перспективны также и оптические запоминающие устройства и, прежде всего, голографические запоминающие устройства. Уже существуют ЭВМ с голографическими запоминающими устройствами. Эти устройства отличаются высокой информационной емкостью в сочетании с малым временем выборки нужной информации из памяти ЭВМ. На рис. 52 сравниваются эти характеристики для запоминающих устройств разного типа. По горизонтальной оси откладывается полная емкость памяти, по вертикальной — время выборки данных. Можно видеть, что, например, полупроводниковые запоминающие устройства отличаются малым временем выборки, но зато они имеют и малую емкость

памяти. У запоминающих устройств на магнитных лентах, напротив, емкость памяти огромна, но зато велико и время выборки. В этом смысле наиболее перспективными оказываются оптические запоминающие устройства. Надо иметь в виду также и то, что голографическая память позволяет

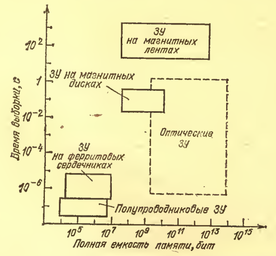


Рис. 52. Емкость памяти и время выборки данных для различных запоминающих устройств.

хранить и впоследствии восстанавливать не просто изображения, а реальные световые поля (см. шестой рассказ).

Будут ли созданы оптические вычислительные машины? В настоящее время просматриваются три основных направления в развитии систем оптической обработки информации:

1) создание оптических *цифровых* вычислительных машин с широким применением волоконной оптики, различных оптико-электронных и оптических компонентов, оптических запоминающих устройств и процессоров;

2) создание *аналоговых* оптических систем, предназначенных для обработки информации, представляемой в виде двумерных изображений, с широким применением управляемых транспарантов, допускающих полутоновую запись (запись, в которой есть не просто «темные» и «светлые» участки, а участки разной степени освещенности);

3) создание оптических вычислительных систем с *картинной логикой*, где осуществляется одновременная об-

работка больших массивов информации, представленной в виде двумерных изображений.

Ожидается, что развитие систем оптической обработки информации позволит в ближайшем будущем создать малогабаритные универсальные быстродействующие вычислительные комплексы. Эти комплексы будут способны управлять сложными производственными процессами, определяемыми множеством параметров, создавать эффективную систему учета, планирования и управления экономикой и т. д.

Темпы развития систем оптической обработки информации зависят от ряда факторов:

1) развития *элементной базы* (создания новых материалов для ЭУТ и ОУТ с высоким разрешением и быстродействием, разработки новых оптических и оптико-электронных компонентов);

2) усовершенствования технологии изготовления различных элементов оптических схем;

3) создания новых, более стабильных и экономичных лазерных источников света;

4) разработки новых, более эффективных схем и методов оптической обработки сигналов.

Конечной целью развития систем оптической обработки информации следует признать создание *полностью оптической* вычислительной машины. В такой машине все сигналы (как информационные, так и управляющие) будут оптическими, а снабжение энергией будет производиться за счет оптической накачки активных центров. Достигнутые в настоящее время успехи дают основание рассматривать такую задачу как реалистическую. Однако это — задача завтрашнего дня.

А сегодня ставится пока более скромная задача — создание оптико-электронной быстродействующей вычислительной машины, эффективно сочетающей электронные и оптические методы обработки, хранения и передачи информации. Ожидается, что в ближайшем будущем будет создана такая вычислительная машина. Она будет характеризоваться следующими параметрами: быстродействие процессора (время, затрачиваемое на выполнение одной операции) 10^{-9}—10^{-10} с, число одновременно выполняемых операций 10^3—10^4, емкость оперативного запоминающего устройства 10^8—10^9 бит, емкость внешней памяти 10^{11}—10^{13} бит, скорость ввода и вывода информации 10^9 бит/с.

Справка. Этапы развития современной вычислительной техники. Характеризуя этапы развития вычислительной техники, принято говорить о различных поколениях ЭВМ. В настоящее время различают четыре последовательных поколения ЭВМ, говорят о появлении ЭВМ пятого поколения. Общее представление об ЭВМ четырех поколений дает следующая таблица:

Таблица

Поколение, время его появления	Логические элементы	Основные конструкционные элементы	Тип памяти
1-е, начало 50-х годов	Электронные лампы	Стандартные электронные компоненты	Магнитная
2-е, конец 50-х годов	Транзисторы	Вентильные схемы	То же
3-е, начало 60-х годов	Интегральные схемы	Группы схем	Магнитная, полупроводниковые ЗУ (ППЗУ)
4-е, начало 70-х годов	Средние и большие интегральные схемы (БИС)	Функциональные блоки (регистры, сумматоры), микропроцессоры	Магнитная, интегральные ППЗУ, оптическая
5-е, 80-е годы	БИС и сверх-БИС	Мультипроцессоры, микроЭВМ, оптико-электронные схемы	То же, голографическая

Поколение, время его появления	Математическое обеспечение	Быстродействие процессора, с	Емкость оперативного ЗУ, бит
1-е, начало 50-х годов	Машинные языки, подпрограммы, универсальные программы	от 10^{-2} до 10^{-4}	10^4
2-е, конец 50-х годов	Языки высоких уровней: «Алгол», «Кобол», «Фортран», мониторы, макроассемблеры, управляющие программы	10^{-5}	10^5
3-е, начало 60-х годов	Операционные системы, системы языков, пакеты программ, языки моделирования, модульные программы	от 10^{-6} до 10^{-7}	от 10^5 до 10^6
4-е, начало 70-х годов	Расширяемые языки, метатрансляторы, аппаратурная реализация подпрограмм, банки данных, разговорный режим	от 10^{-7} до 10^{-8}	от 10^6 до 10^8
5-е, 80-е годы	То же, речевой ввод данных	до 10^{-9}	до 10^9

Из таблицы видно, что усовершенствование ЭВМ от поколения к поколению идет по двум направлениям: а) усовершенствование математического обеспечения (повышение эффективности алгоритмов, оптимизация программ, внедрение языков более высокого уровня и т. п.), б) технические усовершенствования (увеличение быстродействия процессора, повышение емкости памяти и т. п.).

Первое поколение ЭВМ использовалось для решения чисто вычислительных задач научного и коммерческого характера. Второе поколение применялось (и применяется) для обработки больших массивов данных. ЭВМ третьего поколения решают проблему представления этих данных в информативном виде; машина выделяет из набора данных нужную информацию и подвергает ее определенной обработке. ЭВМ четвертого поколения способны решать задачи в режиме непосредственного взаимодействия с потребителем информации, в частности задачи управления различными процессами. ЭВМ пятого и последующих поколений будут программироваться по принципу «что сделать» (а не «как сделать»); способ решения задачи машина будет выбирать сама. При конструировании этих ЭВМ найдут применение технические усовершенствования, использованные в ЭВМ четвертого поколения: переход к большим интегральным схемам, усовершенствование магнитной и полупроводниковой памяти и т. п. Конечно, будут применяться и качественно новые технические усовершенствования.

К последним относятся усовершенствования, связанные с использованием оптических методов обработки информации и широким применением лазерной техники, волоконной оптики, голографии для построения устройств ввода и вывода информации, памяти, процессоров. В настоящее время в СССР (прежде всего в Физическом институте имени П. Н. Лебедева АН СССР) и за рубежом развернуты работы по созданию оптико-электронных многоканальных вычислительных машин, отвечающих требованиям, предъявляемым к ЭВМ четвертого и пятого поколений.

ЛАЗЕРНЫЙ КОНТРОЛЬ

Сразу же после изобретения лазера стало ясно, что лазерное излучение должно хорошо подходить для роли контролера. Правда, самые первые шаги были довольно скромными — лазерный луч считал молочные бутылки на конвейере. Очень скоро область применения лазерного контроля сильно расширилась. Сегодня лазерный контроль используется в разнообразных исследованиях и производственных процессах, в самых различных областях жизни и деятельности людей. В этом можно убедиться, познакомившись с приводимыми ниже примерами.

Как лазерный луч контролирует состояние атмосферы? Проблема *загрязнения воздуха* в больших городах и индустриальных районах становится в наши дни все более острой. В выхлопах автомобильных двигателей, реактивных двигателей современных авиалайнеров, в выбрасываемых в атмосферу отходах промышленного производства содержится много соединений, вредных для здоровья людей: двуокись серы (SO_2), окись углерода или, иначе, угарный газ (CO), углекислый газ (CO_2), окись азота (NO), метан (CH_4), сероводород (H_2S) и пр. Возрастает содержание в воздухе частичек сажи и пыли, водяных капелек с растворенными в них различными химическими соединениями.

Для обнаружения в атмосфере тех или иных загрязнений проводят химический анализ проб воздуха. К сожалению, такой анализ требует обычно значительного времени. К тому же не всегда просто взять пробу воздуха. Представьте, например, что вам надо взять (и притом быстро) пробу воздуха позади только что пролетевшего авиалайнера на высоте в несколько километров. Или хотя бы взять пробу воздуха вблизи устья заводской трубы высотой более ста метров.

Подобные трудности не возникают, если вместо того, чтобы брать пробы воздуха, зондировать атмосферу лазерным лучом. Лазерный контроль загрязнений атмосферы

получил в настоящее время широкое распространение как в СССР, так и за рубежом. Он имеет ряд весьма существенных достоинств. Во-первых, этот метод контроля является *дистанционным*; он может легко осуществляться на расстояниях до нескольких километров (в отдельных случаях до десятков километров). Во-вторых, лазерный контроль отличается *высокой степенью чувствительности*. Он позволяет обнаружить загрязнение атмосферы тем или иным соединением даже в случаях, когда доля этих соединений в атмосфере всего 10^{-9}—10^{-10}. В-третьих, анализ химического состава загрязнений производится в

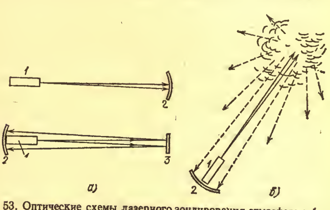


Рис. 53. Оптические схемы лазерного зондирования атмосферы: *1* — лазер, *2* — фотоприемник, *3* — отражатель.

данном случае *очень быстро*, так что возможно отслеживание *изменений* этого состава во времени.

На практике применяют две оптических схемы лазерного зондирования атмосферы. В первой лазерный луч посылают по подлежащей контролю трассе к фотоприемнику, который находится в конце трассы. Возможен вариант, когда в конце трассы установлен отражатель, а фотоприемник совмещен с лазерным излучателем (при этом лазерный луч проходит трассу дважды — туда и обратно). Оба варианта данной оптической схемы показаны на рис. 53, *а*. Во второй схеме (она показана на рис. 53, *б*) лазерный луч посылается в контролируемую область воздушного пространства. Фотоприемник, совмещенный, как правило, с излучателем, улавливает излучение, приходящее назад из облучаемой лазером области пространства. В этом случае лазерную систему контроля состояния

атмосферы называют *лидаром*. Лидар можно рассматривать как разновидность лазерного локатора.

При использовании схемы, показанной на рис. 53, *а*, измеряют интенсивность лазерного луча после прохождения трассы. Существенно, что это измерение выполняют для *различных* частот лазерного излучения, для чего используют лазеры с плавной перестройкой частоты (например, лазеры на красителях) или лазеры в сочетании с параметрическим генератором света. Каждое химическое соединение поглощает свет с определенной частотой (или с несколькими определенными частотами). Измеряя *частотную зависимость интенсивности* лазерного излучения, регистрируемого фотоприемником, можно по значениям частоты, при которых наблюдаются резкие уменьшения («провалы») в интенсивности света, заключить о наличии в атмосфере тех или иных химических соединений. В результате *поглощения лазерного излучения* молекулами этих соединений и возникают «провалы» в интенсивности излучения на соответствующих частотах.

Используя схему, показанную на рис. 53, *б* (схему лидара), регистрируют при помощи фотоприемника либо отраженное лазерное излучение (например излучение, отраженное от скопления аэрозолей), либо излучение, рассеянное аэрозольными частицами или отдельными молекулами, либо излучение, испускаемое теми или иными молекулами после поглощения ими лазерного излучения.

Существует несколько физических механизмов рассеяния света. Для контроля химического состава загрязнений атмосферы используют *комбинационное рассеяние света*, поскольку при этом рассеянии изменяется частота света. Напомним, что атомы в молекуле совершают колебания и что эти колебания характеризуются определенной для данного химического соединения частотой (или несколькими определенными частотами). В простейшем случае, когда молекула двухатомная, имеется всего одна колебательная частота; обозначим ее через $\nu_м$. Предположим, что на газ из таких молекул падает лазерный пучок частоты ν. В результате рассеяния света на колеблющихся молекулах возникает излучение на частотах $\nu-\nu_м$ и $\nu+\nu_м$. Это и есть комбинационное рассеяние света.

Будем зондировать атмосферу лазерным лучом определенной частоты и измерять спектральный состав света, рассеянного назад. По наблюдаемым в рассеянном свете сдвигам частоты (длины волны) можно судить о наличии в атмосфере тех или иных соединений. Предположим, что ис-

пользуется лазер на рубине; его излучение имеет длину волны 0,694 мкм. Допустим далее, что в рассеянном излучении, наряду с длиной волны 0,694 мкм, зарегистрированы длины волн 0,798 и 0,785 мкм. Сдвиг длины волны 0,798—0,694= =0,104 мкм соответствует частоте колебаний молекулы CO, а сдвиг 0,785—0,694=0,091 мкм — частоте колебаний молекулы NO. Значит, в атмосфере присутствуют угарный газ и окись азота.

Заметим, что для контроля состава атмосферы по комбинационному рассеянию света удобнее использовать (по ряду причин) лазерное излучение с длиной волны около 0,3 мкм. На практике обычно применяют вторую гармонику излучения рубинового лазера (0,347 мкм), а также четвертую гармонику лазера на гранате с неодимом (0,266 мкм).

Наряду с комбинационным рассеянием света в лидарах используется явление *люминесценции*. С этим явлением читатель уже встречался на примере спонтанного испускания света активными центрами в активном элементе лазера. Так, ионы хрома в рубине поглощают свет в синей и желто-зеленой областях спектра (излучение накачки), а затем высвечиваются в красной области спектра. В отсутствие лазерного резонатора высвечивание происходит спонтанно; это и есть люминесценция. То же может происходить и в различных молекулах. Поглощая лазерное излучение некоторой частоты, они затем высвечивают излучение другой (меньшей) частоты. Частота, на которой наблюдается люминесценция, имеет определенное значение (или несколько определенных значений) для данного соединения. Изучая спектральный состав улавливаемого приемником лидара излучения люминесценции, можно выявить наличие в атмосфере тех или иных химических соединений.

В качестве примера рассмотрим созданный в Институте спектроскопии АН СССР в Москве лидар для контроля промышленных загрязнений атмосферы, использующий комбинационное рассеяние света. Схема лидара приведена на рис. 54. Лазер на гранате с неодимом генерирует излучение с длиной волны 1,06 мкм. В нелинейном кристалле K_1 рождается вторая гармоника этого излучения, а затем в кристалле K_2 — четвертая гармоника. Таким образом, зондирующее излучение имеет длину волны 0,266 мкм. Лазерный луч проходит через расширитель пучка и посылается в исследуемую область воздушного пространства. Дальность действия данного лидара 100 м, протяженность зондируемого слоя атмосферы 20 м. Лидар посылает зондирующие импульсы с энергией 1 мДж при частоте повторения 50 Гц.

Рассеянное излучение улавливается приемным зеркалом диаметром 80 см и затем поступает в спектрограф.

В настоящее время исследуются возможности более широкого применения лазеров для контроля состояния атмосферы. Один из основных центров этих исследований в СССР — Институт оптики атмосферы АН СССР в Томске.

Исследования показали, что лазеры можно успешно применять не только для контроля химического состава загрязнений атмосферы. Лидары четко выявляют границы *областей повышенной загрязненности атмосферы*, например, частицами дыма из заводских труб; позволяют изучать перемещения этих областей, изменение их формы. В данных исследованиях используется отражение лазерного луча от скопления аэрозолей и обычное, без изменения частоты излучения, рассеяние света аэрозольными частицами.

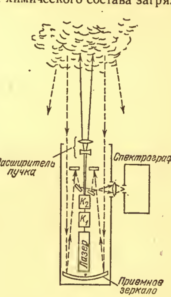


Рис. 54. Лидар для контроля промышленных загрязнений атмосферы.

С помощью лазеров измеряют также стандартные *метеорологические параметры атмосферы*: температуру, плотность, влажность, скорость ветра. В этом отношении лазерное зондирование может успешно конкурировать с радиозондами и метеорологическими ракетами.

Наконец, возможно лазерное зондирование *облаков*: точное измерение их нижней границы, исследование зарождения и развития облака, изучение пространственной структуры облаков. Лазерную локацию облачности производят как с поверхности Земли, так и со специальных самолетов. В недалеком будущем лидары будут устанавливаться также на искусственных спутниках Земли.

Зачем нужен летающий лидар? Установленный на борту самолета лидар удобен для изучения физических процессов, происходящих в облаках, например процессов, приводящих к возникновению грозы. В неменьшей степени такой

лидар полезен и для контроля состава морской воды вблизи ее поверхности.

Морская вода — сложная среда, в которой находятся различные минеральные и органические вещества, а также мелкие водоросли и биологическая взвесь, называемые планктоном. Наряду с лесами, планктон, рассеянный по огромной поверхности океанов, является той естественной лабораторией, где совершается процесс *фотосинтеза* — процесс, без которого была бы невозможна жизнь на Земле. К сожалению, в наше время поверхность океанов все более загрязняется, главным образом *нефтепродуктами*. Загрязнения отравляют морскую воду, нарушают протекающие в ней естественные процессы и, в частности, процессы фотосинтеза. Прикрытый сверху нефтяной пленкой планктон утрачивает способность к фотосинтезу.

Лазерное зондирование поверхности моря или океана с борта самолета (летящего со скоростью около 400 км/ч на высоте в несколько сотен метров над поверхностью воды) позволяет легко выявить области жизнеспособного планктона, а также участки водной поверхности, покрытые пленкой нефти, позволяет обнаружить в морской воде те или иные загрязнения. При лазерном зондировании регистрируют: а) то место поверхности океана, куда в данном случае был направлен лазерный луч (и откуда, следовательно, пришло излучение-отклик), б) интенсивность отклика, в) его спектральный состав. В качестве зондирующего излучения применяют, например, импульсы лазера на азоте (длина волны 0,34 мкм) или импульсы второй гармоники лазера на гранате с неодимом (0,53 мкм). Излучение-отклик может представлять собой излучение люминесценции, возникающей в морской воде в результате поглощения в ней лазерного излучения. Если, например, излучение люминесценции имеет длину волны 0,68 мкм, то это означает, что в данном месте поверхности океана находится жизнеспособный планктон. Планктон, утративший способность к фотосинтезу, или пленка нефти люминесцируют на иных длинах волн. Сканируя лазерным лучом по водной поверхности, простирающейся под бортом самолета, можно быстро определить границы участка, богатого планктоном, или, напротив, границы участка, покрытого нефтяной пленкой. При этом по интенсивности излучения люминесценции можно судить о плотности приповерхностного слоя планктона или о толщине нефтяной пленки.

Что такое голографическая интерферометрия? Когда мы рассматривали принципы голографии (см. шестой

рассказ), то подчеркивали, что при считывании голограммы объекта непрерывно воспроизводятся световые волны, являющиеся копиями той световой волны, которая отразилась от объекта в момент записи голограммы. Теперь предположим, что голограмма объекта записывалась дважды — в два разных момента времени (моменты t_1 и t_2). При считывании такой голограммы будут *одновременно* воспроизводиться два типа световых волн. Волны одного типа являются копиями световой волны, отразившейся от объекта в момент времени t_1, а другого — в момент t_2. Оба типа световых волн когерентны и, следовательно, будут интерферировать друг с другом. Интерференция этих волн и составляет предмет изучения *голографической интерферометрии*.

Допустим, что объект есть деталь некоторой конструкции или некоторого прибора, подвергающаяся во время эксплуатации механическим нагрузкам. Снимем эту деталь на голограмму дважды — в моменты времени t_1 и t_2. При этом пусть в момент t_1 механические нагрузки отсутствуют, а в момент t_2 они имеются и вызывают определенную деформацию детали. Деформация, как правило, невелика и «на глазок» не заметна. Поэтому при считывании голограммы восстановится вполне четкое (отнюдь не двойное) изображение детали. Оно будет, однако, покрыто системой хорошо различимых невооруженным глазом *интерференционных полос*. Эти полосы — результат интерференции двух световых волн, одна из которых отразилась от ненагруженной (недеформированной) детали, а другая — от нагруженной (деформированной) детали. Получившееся изображение называют *голографической интерферограммой*. По характеру расположения, форме, ширине интерференционных полос на голографической интерферограмме можно судить о степени и характере деформации поверхности детали в разных ее участках. Определив степень и характер деформаций, можно затем выявить наиболее «опасные» места детали, подвергающиеся наибольшим нагрузкам.

В качестве примера на рис. 55, *а* приведена голографическая интерферограмма металлической вилки, подвергнутой механическим напряжениям; на рисунке представлен участок вблизи прорези вилки.

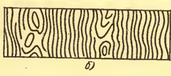
Современная технология предъявляет все более жесткие требования к точности контроля параметров различных изделий как сразу по их изготовлении, так и во время эксплуатации. Нужно выявлять наиболее нагруженные во время работы участки изделия, контролировать размеры и форму изделий, обнаруживать внутренние дефекты и т. п.

При этом часто нежелательно (или попросту невозможно) расчленять изделие на части или даже касаться его «щупами» и шаблонами. Необходимо использовать методы *неразрушающего (бесконтактного)* контроля изделий. Голографическая интерферометрия как раз и является одним из таких методов контроля.

О том, как она помогает выявлять внутренние напряжения в деформированном изделии, мы уже говорили. Заметим, что исследование внутренних напряжений важно не только тогда, когда имеются значительные механические нагрузки; напряжения возникают и при нагревании изделия (например, из-за неодинакового теплового расширения разных его деталей), и при приложении к изделию внешнего электрического поля. Методами голографической интерферометрии можно контролировать деформации (а следовательно, и возникающие механические напряжения) в изделиях самого различного характера: в крыле самолета, строительной балке, крюке подъемного крана, экране кинескопа, деталях тех или иных приборов и т. д.



а)



б)

Рис. 55. Примеры голографических интерферограмм.

Для голографического контроля размеров и формы изделий можно использовать интерференцию двух световых волн, из которых одна отражается *непосредственно от исследуемого изделия*, а другая восстанавливается с голограммы, где был записан *эталонный образец* этого изделия. В данном случае изделие нужно поместить точно в то место пространства, где реализуется мнимое изображение эталонного образца. По картине полос на голографической интерферограмме можно судить о степени и характере отклонений тех или иных участков поверхности изделия от эталонной поверхности. Можно, в частности, отслеживать во времени изменения формы изделия, происходящие в процессе, например, его постепенного нагревания или по мере возраста-

ния механических нагрузок. Можно наблюдать, как при этом на наших глазах изменяется картина полос на интерферограмме. Недаром данный метод голографической интерферометрии называют методом *«живых» полос* (или методом интерферометрии *в реальном времени*). Заметим, что рассматривавшийся ранее метод голографической интерферометрии с записью голограммы изделия в два разных момента времени называют методом *двойной экспозиции*.

Внутри изделия могут быть скрытые от взора *внутренние дефекты*: щели, пустоты, непроваренные стыки. Если изделие металлическое, то рентгеновское просвечивание тут не поможет. Не всегда могут помочь и акустические методы выявления внутренних дефектов. В подобных случаях обращаются к голографической интерферометрии (методу двойной экспозиции). Снимая на одну и ту же голограмму ненагруженное изделие и это же изделие, подвергнутое специально подобранным нагрузкам, можно наблюдать в картине полос на голографической интерферограмме хорошо выраженные *нерегулярности*. По ним можно установить не только сам факт наличия внутренних дефектов, но и их характер и расположение. В качестве простого примера на рис. 55, *б* приведена голографическая интерферограмма изделия, представляющего собой две сваренные пластины из разных металлов. Возможный скрытый дефект — наличие непроваренных участков на внутренних поверхностях пластин. На интерферограмме отчетливо видны области нарушения регулярности интерференционной картины, что и указывает на наличие в этих местах непроваренностей.

Можно ли проследить за полетом пули? Используя возможности голографической интерферометрии, это сделать совсем нетрудно. Воспользуемся оптической схемой записи голограммы, изображенной на рис. 56, *а*; стрелками показан ход световых лучей. В данном случае применяют метод двойной экспозиции. Первая запись голограммы производится в отсутствие пули, вторая — когда пуля пролетает через камеру с газом (появление пули внутри камеры должно автоматически запускать лазерный импульс). При первой экспозиции на голограмму падает объектная волна, фаза которой изменяется при прохождении объема газа, находящегося в спокойном состоянии. При второй экспозиции изменения фазы объектной волны определяются ударными волнами, возникающими в газовой камере во время пролета пули. При считывании голограммы будут воспроизводиться одновременно обе объектных волны. Их интерференция

даст интерферограмму, структура которой будет отражать изменения плотности среды за время между двумя экспозициями. Эта голографическая интерферограмма представлена на рис. 56, *б*.

Позволяя получать моментальные снимки объемного распределения плотности в газовых средах, голографическая интерферометрия дает возможность детально исследовать *быстропротекающие газодинамические процессы*. Снимая последовательность интерферограмм, можно проследить за развитием во времени ударных волн в различных газовых средах при использовании быстро движущихся тел различ-

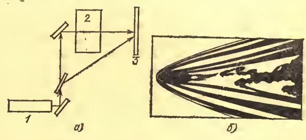


Рис. 56. *а*) Схема записи голограммы: *1* — лазер на рубине, генерирующий гигантские импульсы, *2* — камера с газом, через которую должна пролететь пуля; *3* — голограмма. *б*) Голографическая интерферограмма летящей пули.

ной формы. При помощи голографической интерферометрии исследуют, в частности, обтекание профиля крыла самолета потоком воздуха в аэродинамической трубе.

Голографическая интерферометрия применяется также для исследования относительно плотной *плазмы*. Это может быть плазма, возникающая при фокусировании мощного лазерного излучения на поверхность твердой мишени, плазма импульсных ламп, плазма электрических разрядов, плазменная струя в плазмотроне — газоразрядном устройстве для получения «низкотемпературной» (10^4 К) плазмы. Плазмотроны используются при термической обработке металлов (сварка, резка, плавка), для нанесения покрытий, в спектроскопии.

Нужен ли лазер строителю? Современному строителю приходится возводить высокие сооружения (высотные здания, башни), сооружения с горизонтальными плоскостями большой площади (взлетно-посадочные полосы в современных аэропортах, фундаменты производственных цехов), большие пролетные строения (мосты через широкие реки,

эстакады), подземные сооружения (шахты, тоннели), крупногабаритные сооружения, требующие особо высокой точности монтажа (стапели для сборки современных авиалайнеров, мощные ускорители заряженных частиц, гигантские радиотелескопы). При проведении подобных строительных работ очень важно точно фиксировать *опорные направления* и *плоскости* в пространстве (горизонтальные, вертикальные, под определенными углами). Для этого современному строителю нужен лазерный луч.

В настоящее время в строительстве используется огромное число лазерных *геодезических* приборов различных марок. Их называют лазерными нивелирами, лазерными теодолитами, лазерными зенит-центрирами (приборами вертикального проектирования) и т. д. Во всех этих приборах реализуется возможность визуального обнаружения лазерного луча. Обычно применяют лазеры на гелии-неоне. Лазерный луч фиксирует в пространстве опорную прямую линию, указывающую ось будущего сооружения, относительно которой производятся разметка и компоновка конструкции. Быстро сканируя лазерный луч в определенной плоскости, создают тем самым хорошо различимую опорную световую плоскость.

Лазерный луч применялся, например, при строительстве Останкинской телевизионной башни в Москве. Строители использовали отечественный лазерный зенит-центрир ЛЗЦ-1, работающий на основе гелий-неонового лазера мощностью около 10 мВт с расходимостью излучения 10 угл. мин. Прибор обеспечивал проектирование точек с погрешностью 10 мм (в поперечном к лучу направлении) на расстоянии 500 м. С помощью направленного вверх лазерного луча контролировалась вертикальность Останкинской телебашни. Выявлялись отклонения башни от вертикали как в результате строительных погрешностей, так и под действием ветра и одностороннего нагрева башни солнечными лучами.

В качестве примера рассмотрим лазерный нивелир с вращающимся лазерным лучом «Геоплан-300» (Швеция). Он схематически показан на рис. 57. Дальность действия луча около 200 м. При работе прибора строители могут видеть горизонтальную световую плоскость такого радиуса. Она фиксируется в пространстве с погрешностью менее 1 см (по вертикали).

Можно было бы привести много примеров лазерных геодезических приборов, рассказать о многих конкретных применениях этих приборов в практике современного

строительства. Ограничимся, однако, приведенными примерами.

Следует подчеркнуть, что обычно геодезический контроль — это длительный и трудоемкий процесс. Поэтому важно не только то, что лазерный луч обеспечивает высокую точность геодезического контроля, но и то, что он *ускоряет* процесс контроля и, более того, позволяет его *автоматизировать*. Для автоматизации создают обратную связь от

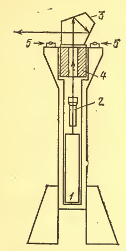


Рис. 57. Лазерный нивелир с вращающимся лучом: *1* — лазер на гелийнеоне, *2* — коллиматор для уменьшения расходимости луча, *3* — пентапризма, превращающая вертикальный луч в горизонтальный, *4* — полый вал двигателя, обеспечивающий ежесекундно более 10 оборотов пентапризмы (а значит, и горизонтального лазерного луча), *5* — уровни для контроля правильности ориентации лазерной установки (для контроля горизонтальности плоскости, фиксируемой лучом).

приемника лазерного излучения к излучателю. Предположим, что излучатель установлен на щите, используемом при проходке тоннеля; лазерный луч фиксирует в данном случае направление проходки. По сигналу, поступающему от приемника этого луча, автоматически включается система, управляющая ориентацией щита и своевременно исправляет случайно возникшие отклонения щита.

Как осуществляют лазерный контроль посадки самолета? Для повышения безопасности полетов на современных реактивных авиалайнерах в СССР разработана и создана лазерная система контроля ночной посадки самолетов — «Глиссада». В определенных точках вблизи взлетно-посадочной полосы устанавливаются непрерывно генерирующие гелий-неоновые лазеры. Направленные определенным образом лучи лазеров (они хорошо видны в сумерки и ночью) образуют *систему линейных ориентиров*, геодезически «привязанную» к взлетно-посадочной полосе. Система задает летчику следующие навигационные параметры: курс посад-

ки *(курсовую плоскость)*, глиссаду снижения *(глиссадную плоскость)*, боковые границы полосы, удаление от нее. Представление о посадке самолета с использованием системы «Глиссада» дает рис. 58; лучи *1*, *2* и *3* задают курсовую плоскость, лучи *4* и *5* задают глиссадную плоскость. На

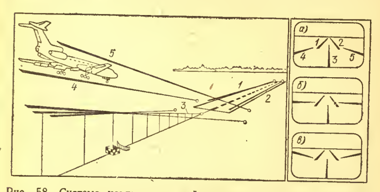


Рис. 58. Система контроля ночиой посадки самолетов — «Глиссада».

том же рисунке показаны для примера три вида на взлетно-посадочную полосу, открывающиеся летчику с воздуха. Во всех трех случаях самолет идет точно по курсу. При этом: *а*) он идет выше глиссады, *б*) идет точно по глиссаде, *в*) идет ниже глиссады.

Почему лазер заинтересовал криминалистов? В криминалистической практике часто бывает необходимо подвергнуть анализу следы крови, краски, лака, губной помады, табачного пепла, металла и т. п., обнаруженные на одежде потерпевшего или лица, подозреваемого в совершении преступления, а также на тех или иных предметах. К сожалению, количество вещества в таких случаях, как правило, столь ничтожно, что обычный химический анализ оказывается невозможным. Затруднен или невозможен в подобных случаях и спектральный анализ с использованием традиционных методов (приготовление пробы с последующим возбуждением ее спектра испускания при помощи пламени, электрической дуги, искры, электронного пучка). Здесь на помощь криминалисту приходит лазерный луч.

Лазерный микроспектральный анализ проводят следующим образом. Используя микроскоп, фокусируют на исследуемое вещество мощный лазерный импульс (световое пятно имеет диаметр около 10 мкм). Вещество на облучаемом участке испаряется, в этом месте возникает плазма. Излучение плазмы фокусируют на входную шель спектрографа. Cv

венно, что для лазерного микроспектрального анализа не требуется заранее готовить какие-либо пробы вещества. Для анализа достаточно всего 10^{-6} г вещества, при этом надежно выявляют наличие в веществе до 60 химических элементов. Криминалист может работать с очень слабыми следами вещества, даже с теми капельками жира, которые содержатся в отпечатках пальцев на посуде или других предметах. Анализ проводится очень быстро, его результаты (спектр вещества) можно сфотографировать и иметь в качестве документа.

Вследствие исключительной локальности воздействия на исследуемый образец, лазерный луч незаменим при спектральном анализе в археологии, где приходится иметь дело с уникальными образцами. Лазерный луч практически не оказывает на исследуемый образец разрушающего действия. После его применения на поверхности образца остается микроскопический кратер диаметром около 10 мкм, который невооруженным глазом и не увидишь.

Скорость, относительная простота (например, возможность обойтись без приготовления проб), высокая точность — все это предопределило широкую область применения лазерного микроспектрального анализа. В настоящее время его применяют не только в криминалистике и археологии, но и в разведке месторождений полезных ископаемых, в исследованиях состава метеоритов, металлографии, медицине, биологических исследованиях и т. д.

ЛАЗЕРНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

Зачем нужен управляемый термоядерный синтез? В 1954 г. в Советском Союзе вступила в строй первая в мире промышленная атомная электростанция. Тем самым советские ученые и инженеры показали всему миру, что человек может использовать атомную энергию в мирных целях. В течение тридцати последующих лет в СССР был построен целый ряд атомных электростанций, спущены на воду мощные атомные ледоколы. Прирученная человеком атомная энергия — это огромная энергия, освобождаемая при делении тяжелых атомных ядер (например, урана или плутония).

Огромная энергия освобождается также при соединении друг с другом (при синтезе) легких атомных ядер — водорода, дейтерия (тяжелого водорода), трития (сверхтяжелого водорода). Ядро дейтерия (D) состоит из протона и нейтрона, а трития (T) — из протона и двух нейтронов. При взаимодействии этих ядер образуются ядро гелия (α-частица) и свободный нейтрон: $D+T \rightarrow {}^4He+n$. Ядро гелия представляет собой весьма прочное образование; энергия связи частиц в нем значительно больше, чем в ядрах дейтерия или трития. Поэтому в реакции синтеза освобождается большое количество энергии: 17,6 МэВ на каждую пару взаимодействующих ядер D и T. Помноженное на огромное число взаимодействующих водородных ядер это количество энергии и дает ту фантастическую энергию, которая освобождается при взрыве водородной бомбы.

Чтобы реализовать реакцию синтеза легких атомных ядер, необходимо нагреть водородную смесь до температуры свыше 10^7 К (это нужно для того, чтобы атомные ядра могли преодолеть кулоновское расталкивание и сблизиться до расстояний, на которых начинают действовать ядерные силы). По этой причине подобные реакции называют *термоядерными*; применяется термин «термоядерный синтез». В водородной бомбе такие огромные температуры созда-

ются в результате взрыва атомной (урановой) бомбы, играющей в данном случае роль взрывателя. При этом происходят неуправляемые процессы, приводящие к катастрофическим разрушениям. А нельзя ли сделать термоядерный синтез *управляемым*?

Над этой проблемой ученые упорно работают вот уже несколько десятков лет. Решение проблемы *управляемого термоядерного синтеза* имеет исключительно важное значение для человечества, так как это есть решение *энергетической проблемы*. Сегодня общество удовлетворяет свои потребности в энергии, главным образом, сжигая уголь, торф, газ, нефть; отчасти (примерно на 10%) эти потребности удовлетворяются за счет энергии гидроэлектростанций и атомных электростанций. К сожалению, природные запасы нефти и газа быстро истощаются. Подсчитано, что человечеству хватит их всего лишь на 30—50 лет. Кроме того, сжигать нефть или газ попросту нерационально; ведь они являются ценным сырьем для получения целого ряда химических продуктов, а также для производства белка. Вот почему так важно овладеть новым и притом практически неисчерпаемым источником энергии — управляемым термоядерным синтезом.

Об этом говорил еще в 1959 г. выдающийся советский ученый-атомник академик И. В. Курчатов: «В результате осуществления управления термоядерной реакцией общество получит в свое распоряжение замечательный и неограниченный источник энергии. Овладение термоядерной энергетикой позволит в будущем экономически более рационально использовать такие ценнейшие виды сырья, как уголь, нефть и природный газ. С применением термоядерной энергетики исчезнет необходимость транспортировки топлива и передачи электроэнергии на большие расстояния».

Исследования по управляемому термоядерному синтезу ведутся в СССР и за рубежом вот уже более 30 лет. Советские ученые решили ряд принципиальных задач: задачу нагрева плазмы до сверхвысоких температур, задачу удержания горячей плазмы внутри вакуумной камеры при помощи магнитного поля и др. Эти исследования проводились (и проводятся) в Институте атомной энергии имени И. В. Курчатова. Исследования привели к созданию установки «Токамак», в которой за счет протекающих в плазме электрических токов удалось получить температуру $1,5 \times 10^7$ К. Ожидается, что на базе подобных установок удастся создать примерно через 10—20 лет первые термоядерные электростанции.

Параллельно ведутся исследования по осуществлению управляемого термоядерного синтеза за счет нагрева термоядерной мишени мощными лазерными импульсами (лазерный термоядерный синтез). В Советском Союзе исследования по лазерному термоядерному синтезу проводятся в Физическом институте имени П. Н. Лебедева АН СССР и в Институте общей физики АН СССР; в этих исследованиях участвуют также ученые Института прикладной математики имени М. В. Келдыша АН СССР.

Как «поджечь» термоядерную реакцию лазерным лучом? Сначала надо приготовить *термоядерную мишень*. Она может представлять собой полый стеклянный или металлический шарик диаметром всего 0,1—1 мм (толщина стенки измеряется микрометрами), наполненный газовой смесью из дейтерия и трития под давлением в несколько десятков атмосфер. На эту мишень фокусируют одновременно

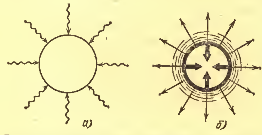


Рис. 59. Действие лазерного излучения на термоядерную мишень.

несколько (например, около десяти) лазерных импульсов длительностью 1—10 нс с суммарной энергией 10^4—10^5 Дж. Лазерные импульсы обстреливают шарик-мишень с разных сторон (рис. 59, *а*). Они реализуют на поверхности мишени световую интенсивность 10^{14}—10^{16} Вт/см². Под действием такой высокой интенсивности света происходит бурное испарение оболочки мишени. Возникает так называемая «корона», стремительно разлетающаяся навстречу лазерным пучкам (рис. 59, *б*). При этом, согласно закону сохранения количества движения, внутренние слои мишени будут стремительно двигаться к ее центру, сжимаясь и нагреваясь до температуры, необходимой для термоядерного синтеза.

Что нужно для осуществления лазерного термоядерного синтеза? Чтобы сфокусировать на термоядерную мишень очень высокую плотность световой мощности, небходимо иметь интенсивное излучение с достаточно высокими когерентными свойствами (при недостаточной когерентности

не удается должным образом сфокусировать излучение на поверхность мишени; напомним читателю рис. 6). Необходимую мощность лазерного излучения получают, во-первых, реализуя режим генерации гигантских импульсов, и, во-вторых, используя многоканальное усиление этих гигантских импульсов. Многоканальное усиление означает, что лазерный луч расщепляется светоделителями и направляется по нескольким параллельным каналам, в каждом из которых он проходит последовательно через ряд усилителей. Затем усиленные световые пучки (в виде коротких мощных импульсов) фокусируются на термоядерную мишень.

Впервые лазерный термоядерный синтез был осуществлен в 1968 г. на установке «Кальмар» в Физическом институте имени П. Н. Лебедева АН СССР (в лаборатории академика Н. Г. Басова). Использовался лазер на стекле с неодимом, генерирующий импульсы длительностью 1 нс. В результате многоканального усиления суммарная энергия девяти лазерных импульсов, одновременно фокусируемых на поверхности мишени, достигла 100 Дж. При очень малых размерах мишени (ее диаметр составлял всего 0,1 мм) это обеспечивало световую интенсивность на поверхности мишени, равную 10^{14} Вт/см^2. Такая интенсивность оказалась достаточной для реализации реакции термоядерного синтеза. Был зарегистрирован поток возникающих в этой реакции нейтронов: 10^6 нейтронов на один микровзрыв мишени.

В настоящее время в Физическом институте АН СССР создается более мощная установка — «Дельфин-2» с 12 лазерными пучками, фокусируемыми на термоядерную мишень. Предполагается получить суммарную энергию лазерного импульса 10^4 Дж. При длительности импульса 1 нс это позволит достичь световой интенсивности на поверхности мишени 10^{15} — 10^{16} Вт/см^2.

Можно сказать, что физические эксперименты по осуществлению лазерного термоядерного синтеза успешно прошли начальную стадию. Представляются перспективными лазерные установки, создаваемые в СССР и в США. Если в СССР в таких установках применяются лазеры на стекле с неодимом, то в США отдается предпочтение CO_2-лазерам. Ученые уверены, что проблема лазерного термоядерного синтеза будет решена в течение ближайших 10 лет. Для перехода от физического эксперимента к практическому использованию лазерного термоядерного синтеза необходимо добиться, чтобы получаемая от лазерного термоядерного реактора полезная энергия существенно превышала

энергетические затраты, связанные с работой этого реактора. Для этого надо, прежде всего, иметь лазеры с заметно более высоким к. п. д., чем сейчас. По-видимому, только после создания мощных импульсных лазеров с к. п. д. 10—20% откроется реальная возможность конструирования промышленной лазерной термоядерной электростанции.

Как обеспечить хорошую фокусировку лазерного луча на термоядерную мишень? Это один из тех вопросов, которые оказываются существенными при практическом осуществлении лазерного термоядерного синтеза. Дело в том, что высококогерентное излучение лазера, прежде чем попасть на мишень, должно пройти через целый ряд усилителей, множество различных оптических элементов (светоделителей, призм, линз и т. д.). В результате мощность излучения возрастает, но в то же время ухудшается степень его когерентности. Усилители, оптические элементы и даже воздушные промежутки искажают волновой фронт лазерного излучения. Все эти искажения по мере прохождения излучением трассы от лазера до мишени постепенно накапливаются, что приводит, в частности, к увеличению расходимости лазерного луча. Если вначале лазерный луч имел расходимость, скажем, 10^{-4} рад (около 10 угловых секунд), то вблизи мишени его расходимость может составлять уже 10^{-3} рад (несколько угловых минут). Известно, что световой пучок с углом расходимости φ имеет в фокальной плоскости линзы с фокусным расстоянием F минимальный диаметр $d \approx \varphi F$. При $F=1$ м и $\varphi=10^{-3}$ рад получаем $d \approx 1$ мм, что в несколько раз может превышать диаметр термоядерной мишени.

Для обеспечения необходимой фокусировки излучения на мишень принимают специальные меры. Например, используют две софокусные линзы с экраном между ними, имеющим малое отверстие. Такое устройство улучшает направленность светового пучка, однако при этом теряется световая мощность. Вместо сферических фокусирующих линз применяют линзы с более сложными поверхностями. Ко всем оптическим элементам схемы предъявляют жесткие требования, касающиеся качества их поверхностей, однородности материала и т. д.

Требования к качеству оптики могут быть, однако, существенно снижены, если корректировать (исправлять) волновой фронт лазерного излучения, используя методы *адаптивной оптики*. Рассмотрим в связи с этим оптическую схему нелинейной адаптивной системы, приведенную на рис. 60, *а*. Лазер посылает на некоторую мишень луч; на

мишени возникает яркий блик, являющийся источником сферической световой волны. Сферическая волна проходит через усилитель и попадает в «нелинейное зеркало». Проходя от мишени до «зеркала», сферическая волна как-то искажается. В «нелинейном зеркале» возникает световая волна с обращенным фронтом; она распространяется назад — от «зеркала» к мишени. Взаимодействуя на этом пути со средой, искажающей фронт, данная волна сформирует на мишени неискаженную сферическую волну. Иными словами, отраженная бликом сферическая волна, проходя через усилитель, претерпевает искажения, а волна с обращенным

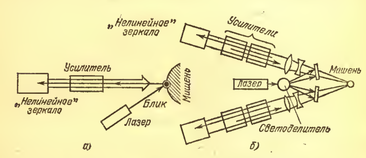


Рис. 60. Оптическая схема нелинейной адаптивной системы, которая может быть использована в лазерных установках управляемого термоядерного синтеза.

фронтом, распространяясь по той же трассе в обратном направлении, эти искажения снимает (компенсирует). В результате на мишень попадает световая волна, которая при большой мощности (она дважды прошла через усилитель) будет иметь и неискаженный фронт. Заметим, что описанная схема аналогична схеме, показанной на рис. 43.

Рис. 60, *б* показывает, как можно использовать подобные схемы в лазерных установках управляемого термоядерного синтеза. Для простоты на рисунке изображен случай, когда на термоядерную мишень фокусируются только два лазерных пучка.

Каким будет лазерный термоядерный реактор? Созданы различные проекты таких реакторов. В одних проектах рассматривается «чистый» реактор, где используется только та энергия, которая высвобождается в реакциях термоядерного синтеза. В других проектах разрабатывается *гибридный* вариант реактора. В нем используются как реакции синтеза водородных ядер, так и реакции деления ядер урана под действием нейтронов, образующихся в реакциях синтеза.

По ряду причин гибридный вариант представляется легче реализуемым, чем «чистый» вариант реактора.

Рассмотрим один из проектов гибридного реактора на основе лазерного термоядерного синтеза. Он разработан группой советских ученых, возглавляемой Л. П. Феоктистовым. Принципиальная схема реактора дана в упрощенном виде на рис. 61. Термоядерная мишень помещается в прочной сферической камере диаметром 60 см; камера может быстро вводиться в реактор и быстро выводиться из него. В рабочем положении камера с термоядерной мишенью находится в центре так называемой «первой сферы» (диаметр

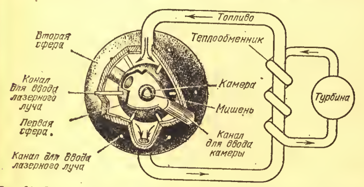


Рис. 61. Схема гибридного реактора на основе лазерного термоядерного синтеза.

сферы 2 м). Имеется также и «вторая сфера»; в ее оболочке находится содержащая литий зона воспроизводства трития. Заметим, что в природе трития нет, так что его надо производить; для воспроизводства трития используют реакцию: $n+{}^{6}Li \rightarrow T+{}^{4}He$. Через пространство, ограниченное первой и второй сферами, прокачивается вещество, играющее в данном реакторе роль топлива. Им является естественный уран (${}^{238}U$), находящийся в измельченном твердом, жидком или газообразном виде. Между первой и второй сферами имеются каналы для ввода лазерного луча; в камере имеются специальные окна для пропускания лазерных лучей (на рисунке они не показаны).

Реактор должен работать следующим образом. Десять раз в секунду в центре реактора появляется очередная камера с термоядерной мишенью, которая тотчас обстреливается лазерными импульсами. Десять раз в секунду происходит микровзрыв термоядерной мишени. Выделяющиеся при этих взрывах нейтроны вызывают деление ядер урана; часть

нейтронов, попадая в оболочку второй сферы, участвует в воспроизводстве трития. Энергия, освобождающаяся при делении ядер урана, поступает в теплообменник; в нем образуется пар, приводящий в действие турбину.

Подсчитано, что, израсходовав 50 т естественного (необогащенного) урана, можно обеспечить работу рассматриваемого реактора в течение 25 лет. При этом предполагается, что лазер имеет к. п. д. 1% и мощность 10^6 Вт. Мощность, выделяющаяся за счет реакций деления ядер урана, как ожидается, будет равна $2{,}5 \cdot 10^9$ Вт. Если принять, что к. п. д. турбины равен 40%, то полезная мощность составит 10^9 Вт. Часть этой мощности (10^8 Вт) будет затрачена на работу лазерной установки, а остальная мощность ($9 \cdot 10^8$ Вт) может использоваться потребителем. Примечательно, что воспроизводство трития в таком реакторе не составляет какой-либо проблемы. Уже через год после начала работы реактора термоядерное горючее будет воспроизводиться с избытком.

КРАТКО О ДРУГИХ ПРИМЕНЕНИЯХ ЛАЗЕРОВ

Мы рассказали о многих профессиях лазерного луча и все же не смогли полностью исчерпать тему. Ограниченный объем книги не позволил поговорить о целом ряде важных и перспективных применений лазеров. Заканчивая книгу, отметим очень кратко, в самых общих чертах, некоторые из этих применений.

Лазерное разделение изотопов. Для различных промышленных, медицинских и научных целей часто требуется вещество, обогащенное каким-либо определенным изотопом данного химического элемента. В связи с этим возникает задача *разделения изотопов*, предполагающая отделение и последующее накопление нужного изотопа. Особенно важна эта задача в атомной энергетике. Речь идет о разделении изотопов урана. Естественный уран содержит в основном изотоп ^{238}U и только 0,7% изотопа ^{235}U. Для ядерных же реакторов (в отличие от рассматривавшегося в одиннадцатом рассказе гибридного реактора) важен как раз изотоп ^{235}U.

Разработаны и используются на практике различные способы разделения изотопов. Одним из наиболее перспективных является лазерный способ, интенсивно развиваемый в последние годы. Лазерное разделение изотопов основано на том, что различные изотопы данного химического элемента поглощают оптическое излучение на разных частотах, точнее говоря, в определенных интервалах частот (эти интервалы называют полосами поглощения). Для избирательного поглощения света надо, чтобы излучение источника было сконцентрировано в пределах узкого интервала частот, соответствующего полосе поглощения нужного изотопа. Важно, чтобы частоту излучения можно было бы плавно перестраивать, подстраивая всякий раз под соответствующую полосу поглощения. Такими источниками света как раз и являются лазеры с плавной перестройкой частоты.

Допустим, что имеется смесь двух изотопов — «нужного» и «ненужного». Будем облучать эту смесь мощным лазерным излучением, подобрав частоту такой, чтобы происходило резонансное поглощение света «нужным» изотопом, но не происходило поглощения «ненужным» изотопом. Поглощая свет, атомы «нужного» изотопа возбуждаются; атомы же «ненужного» изотопа остаются невозбужденными. Воспользуемся далее дополнительным излучением (не обязательно от лазера), которое могут поглощать возбужденные атомы, но не могут поглощать невозбужденные атомы. Предположим, что при поглощении дополнительного излучения возбужденные атомы ионизуются. В результате мы будем иметь «нужный» изотоп в виде ионов, которые легко отделить при помощи электрического поля. Такова сущность одного из методов лазерного разделения изотопов; его называют двухступенчатой фотоионизацией.

В другом методе молекулы с «нужным» изотопом, поглощая лазерное излучение, диссоциируют на атомы. Являясь химически активными реагентами, атомы вступают в химическую реакцию со специально вводимыми в смесь молекулами. В образующихся при этом молекулах нового химического соединения присутствуют атомы только «нужного» изотопа. Отделяя это соединение, тем самым осуществляют разделение изотопов.

Подчеркнем, что отмеченные методы основаны на процессах *избирательной (селективной) ионизации* строго определенных атомов или *избирательной диссоциации* строго определенных молекул под действием лазерного излучения соответствующей частоты.

Лазерное получение чистых веществ. Практическая важность методов избирательного воздействия лазерным лучом на вещество отнюдь не ограничивается рамками проблемы разделения изотопов. Следует говорить о возникновении и развитии принципиально новой технологии получения материалов, когда при помощи лазерного луча производится отбирание и накопление вещества в буквальном смысле «по атомам», «по молекулам». Используя избирательную ионизацию атомов или избирательную диссоциацию молекул под действием лазерного излучения, можно получать особо чистые вещества. Например, можно снизить долю содержания примесей в данном химическом элементе или химическом соединении до 10^{-10}%. Это на несколько порядков меньше доли примесей, остающихся при применении обычных методов очистки вещества. Избирательная фотодиссоциация молекул успешно применяется в наши дни для эф-

фективной очистки различных газовых смесей от ненужных примесей, например от примесей токсичных веществ.

Лазерная химия. Лазерное излучение способно не только отбирать «нужные» атомы или молекулы, но, более того, оно может избирательно воздействовать на те или иные внутримолекулярные связи, может разрывать эти связи и тем самым определенным образом разрушать молекулы, может вызывать и ускорять некоторые химические реакции. Все это составляет предмет нового направления современной химии, которое может быть названо *лазерной химией.*

Как известно, химическая реакция происходит тогда, когда молекулы реагирующих соединений получают необходимую энергию активации, позволяющую молекулам преодолеть силы взаимного отталкивания и достаточно сильно сблизиться друг с другом. Обычно для этого смесь реагентов нагревают, вследствие чего возрастает скорость поступательного движения молекул. Можно, однако, пойти по другому пути, усиливая не поступательное движение молекул, а колебательные движения атомов внутри молекул. Такой путь начал интенсивно развиваться с применением лазерного излучения для возбуждения химических реакций. Указанный путь более перспективен (по сравнению с традиционным нагреванием реагентов), так как при этом можно возбуждать лишь определенные типы колебаний атомов в данной молекуле и тем самым осуществлять *управление характером, направлением и скоростью химических реакций.* Избирательное возбуждение тех или иных типов колебаний атомов в молекуле осуществляют при помощи лазеров с плавной перестройкой частоты, генерирующих в инфракрасной области спектра. Надо всякий раз соответствующим образом подстраивать частоту лазерного излучения — чтобы она точно совпадала с частотой определенного типа колебаний.

Позволяя целенаправленно воздействовать на химические реакции, лазерное излучение делает возможным как уничтожение отходов современного производства (например использованных полиэтиленовых упаковок), так и прямой синтез новых химических соединений.

Лазеры в сельском хозяйстве. Лазерный луч может избирательно воздействовать также на различные биологические процессы, в определенных случаях заметно стимулируя их. Мы уже говорили об этом в четвертом рассказе, когда отмечали успехи лазерной терапии. Здесь мы коснемся использования лазерного излучения в сельском хозяйстве.

Уже несколько лет проводятся исследования по обработке семян различных зерновых и овощных культур маломощным излучением гелий-неонового лазера. Получены интересные результаты: после лазерного облучения всхожесть семян томатов и огурцов повышается на 10—20%, растения быстрее развиваются, дают больше плодов. Оказалось также, что при помощи лазерного луча можно создавать новые и притом устойчивые сорта культур.

Подобные исследования находятся еще в самой начальной стадии. Однако уже сегодня очевидна их практическая ценность.

Лазерная спектроскопия. В традиционной спектроскопии, использующей обычные (нелазерные) источники света, например электрический разряд или пламя, изучают спектр исследуемого вещества, возникающий в результате квантовых переходов между громадным числом энергетических уровней атомов и молекул вещества. Применяя лазерное излучение с высокой степенью монохроматичности, можно избирательно инициировать квантовые переходы всякий раз между *определенными уровнями* атомов и молекул. Перестраивая частоту лазерного излучения, можно «просмотреть» по отдельности различные квантовые переходы. Это позволяет очень точно исследовать спектр вещества, выявить детали, которые обычно не обнаруживаются при проведении традиционного спектрального анализа.

Одно из важных практических применений лазерной спектроскопии — контроль загрязнений атмосферы и морской воды, о чем мы говорили в десятом рассказе. Там же мы говорили и о другом применении лазерной спектроскопии — лазерном микроспектральном анализе. Здесь проявилось еще одно достоинство методов лазерной спектроскопии: они позволяют обходиться незначительными количествами исследуемого вещества. Особое направление в лазерной спектроскопии связано с использованием пикосекундных лазерных импульсов. Посылая мощный пикосекундный импульс в вещество, можно инициировать там те или иные сверхбыстрые процессы. С помощью относительно слабых пикосекундных импульсов можно затем исследовать эти процессы.

Пикосекундная спектроскопия первичных процессов фотосинтеза. *Фотосинтез* — совокупность сложных биологических процессов, происходящих в зеленых листьях растений, морских водорослях, определенных типах бактерий. *Первичные процессы фотосинтеза* включают в себя: поглощение света молекулами хлорофиллов и вспомогательными пигментами; перенос поглощенной энергии к так называе-

мым «реакционным центрам», где происходит разделение электрических зарядов; стабилизацию разделенных зарядов, являющуюся подготовительным этапом к последующим окислительно-восстановительным реакциям. Передача энергии возбуждения в «реакционные центры» и происходящее в них разделение зарядов совершаются крайне быстро — за время от 10^{-9} до 10^{-12} с. До появления лазеров, генерирующих пикосекундные импульсы, ученые не имели «инструмента» для детального исследования столь быстрых процессов. Теперь такой «инструмент» есть, и соответствующие исследования проводятся весьма интенсивно (как в нашей стране, так и за рубежом). В СССР первый пикосекундный лазерный спектрофлюориметр для изучения первичных процессов фотосинтеза создан на кафедре биофизики МГУ в 1975 г. Пикосекундные лазерные импульсы позволили выявить структуру «реакционных центров», прозондировать различные промежуточные состояния, уточнить картину протекания первичных процессов фотосинтеза.

Лазеры решительно и притом широким фронтом вторгаются в нашу действительность. Они необычайно расширили наши возможности в самых различных областях — обработке материалов, медицине, измерениях, контроле, обработке и передаче информации, физических, химических и биологических исследованиях. Уже сегодня лазерный луч овладел множеством полезных и интересных профессий. Во многих случаях применение лазерного луча позволяет получать уникальные результаты. Можно не сомневаться, что в будущем луч лазера подарит нам новые возможности, представляющиеся сегодня фантастическими.

Мы уже начали привыкать к мысли, что «лазер все может». Подчас это мешает трезво оценить реальные возможности лазерной техники на современном этапе ее развития. Неудивительно, что чрезмерные восторги по поводу возможностей лазерного луча иногда сменяются некоторым охлаждением к лазерам. Все это, однако, никак не может замаскировать основной факт — с изобретением лазера человек получил в свое распоряжение качественно новый, в высокой степени универсальный, очень эффективный «инструмент» для повседневной производственной и научной деятельности. С годами этот «инструмент» будет все более совершенствоваться, а вместе с этим будет непрерывно расширяться и область применения лазеров.

Лев Васильевич Тарасов

ЛАЗЕРЫ: ДЕЙСТВИТЕЛЬНОСТЬ И НАДЕЖДЫ

Серия «Библиотечка «Квант»

Редактор *Л. П. Русакова*
Художественный редактор *Г. М. Коровина*
Технический редактор *Л. В. Лихачева*
Корректор *И. Я. Кришталь*

ИБ № 12790

Сдано в набор 17.12.84. Подписано к печати 31.05.85. Т-12323. Формат $84 \times 108^1/_{32}$. Бумага тип. № 3, Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 9,24. Усл.-кр. отт. 9,66. Уч.-изд. л. 10,23. Тираж 100 000 экз. Заказ № 638. Цена 30 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071 Москва В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типография» имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
113054, Москва, Валовая, 28

1С

30 коп.